



TUGAS AKHIR - MO141326

**STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMEN OLAH
GERAK DAN DINAMIKA TEGANGAN SISTEM
TAMBAT *TAUT SPAR HELICAL STRAKES*
DENGAN VARIASI SUDUT *MOORING LINE*
PADA SATU KETINGGIAN *FAIRLEAD***

MOCH AGUS RIANDYKA

NRP. 043114 40000 126

Dosen Pembimbing :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 60111

2018



FINAL PROJECT - MO141326

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF MOTIONS AND TAUT MOORING SYSTEM TENSION OF SPAR HELICAL STRAKES WITH VARIATION OF MOORING LINE ANGLES AT ONE FAIRLEAD LEVEL

MOCH AGUS RIANDYKA

NRP. 043114 40000 126

Supervisors :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 60111

2018

**STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK DAN
DINAMIKA TEGANGAN SISTEM TAMBAT *TAUT SPAR*
HELICAL STRAKES DENGAN VARIASI SUDUT *MOORING*
LINE PADA SATU KETINGGIAN FAIRLEAD**

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

MOCH AGUS RIANDYKA

NRP. 04311440000126

Disetujui oleh :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)

Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. (Pembimbing 2)

Ir. Murdjito, M.Sc., Eng. (Penguji)

Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji)

SURABAYA, JULI 2018

STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMEN OLAH GERAK DAN DINAMIKA TEGANGAN SISTEM TAMBAT *TAUT SPAR HELICAL STRAKES* DENGAN VARIASI SUDUT *MOORING LINE* PADA SATU KETINGGIAN *FAIRLEAD*

Nama : Moch Agus Riandyka
NRP : 043114 40000 126
Departemen : Teknik Kelautan FTK – ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

ABSTRAK

SPAR merupakan salah satu *compliant floating structure* yang digunakan untuk menjadi fasilitas pengeboran, produksi, pemrosesan, maupun penyimpanan pada perairan dalam. Saat beroperasi SPAR akan menerima beban lingkungan yang mengakibatkan perubahan respon struktur SPAR dan akhirnya berdampak pada proses operasi dari SPAR. Untuk mengurangi respon struktur yang diakibatkan oleh beban lingkungan terutama gelombang digunakan sistem tambat (*mooring system*) pada struktur SPAR. Dalam penelitian ini dilakukan studi numerik dan eksperimen untuk respon gerakan struktur (*heave*, *pitch* dan *surge*) dan dinamika tegangan tali dengan variasi sudut *mooring line* (20°, 25° dan 30°) pada satu ketinggian *fairlead*. Gelombang yang digunakan adalah gelombang reguler dengan arah gelombang 0°. Pada akhirnya akan diperoleh sudut sistem tambat manakah yang optimal jika ditinjau dari respon struktur dan tegangan tali tambat.

Penambahan *Helical Strakes* pada SPAR menunjukkan respon gerakan *heave* dan *pitch* yang lebih kecil dibandingkan SPAR tanpa *Helical Strakes*, serta respon gerakan *surge* yang lebih besar dari tanpa *Helical Strakes*. Uji eksperimen kondisi tertambat terjadi resonansi pada periode 2.6 detik untuk gerakan *pitch* dan *surge*. Hasil analisa variasi sudut *mooring line* 20°, 25°, dan 30° menunjukkan, maksimum RAO *pitch* dan tegangan tali terjadi pada sudut *mooring line* 20° sebesar 5.684 θ/m dan 339.193 ton/m.

Kata kunci: SPAR, sistem *mooring*, RAO gerak and tegangan tali, sudut *mooring line*

**NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF MOTIONS AND TAUT
MOORING SYSTEM TENSION OF SPAR HELICAL STRAKES WITH
VARIATION OF MOORING LINE ANGLES AT ONE FAIRLEAD LEVEL**

Name : Moch Agus Riandyka
REG. : 043114 40000 126
Department : Teknik Kelautan FTK-ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

ABSTRACT

SPAR is one of the compliant floating structures that is typically used as drilling, production, processing, and storage facilities in deep water. SPAR receives environmental loads of wind, current and wave. Those loads can cause disruption of SPAR operation process. To reduce the structural response caused by environmental loads, mooring system must be applied to the SPAR structure. In this research, experiments and numerical study have been performed for structural motion response (heave, pitch and surge) with variation of mooring line angle (20°, 25°, and 30°) at single point fairlead level. The wave type used is regular wave with the direction of wave 0°. So, it will be obtained the optimal angle of the mooring system based on result of the structure response and mooring tension.

The additional of Helical Strakes caused lower response of heave and pitch, also higher response of surge. The experimental test in the tied condition resonance occurs in the period of 2.6 seconds for pitch and surge motion. In variation of mooring line angle, the result shows maximum RAO pitch and tension occurred at mooring line angle of 20° are 5.684 deg/m and 339.193 ton/m.

Keyword: *SPAR, mooring system, RAO motion and tension, angle of mooring lines*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah puji syukur kepada Allah SWT berkat rahmat dan karuniaNya penulis dapat menyelesaikan penulisan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya. Tak lupa sholawat serta salam kita curahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW.

Laporan Tugas Akhir ini berjudul “Studi Numerik dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Tegangan Sistem Tambat *Taut SPAR Helical Strakes* Dengan Variasi Sudut *Mooring Line* Pada Satu Ketinggian *Fairlead*” dibuat sebagai salah satu syarat dalam menyelesaikan studi di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tugas Akhir ini membahas mengenai olah gerak struktur SPAR dan tegangan tali tambat SPAR yang dianalisis secara numerik dan eksperimen. Harapan dengan adanya Tugas Akhir ini dapat menambah wawasan pembaca mengenai perilaku gerakan SPAR dan tegangan tali tambatnya.

Penulis menyadari laporan Tugas Akhir yang telah dibuat memiliki kekurangan dan masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran akan sangat membantu penulis untuk meningkatkan kemampuan agar lebih baik dalam penyusunan laporan ke depannya.

Surabaya, 2018

Moch Agus Riandyka

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung pelaksanaan Tugas Akhir dan juga dalam penulisan laporan ini hingga selesai dengan baik, meliputi :

1. Orang tua dan keluarga penulis yang tidak pernah berhenti dalam memberi motivasi, dukungan, dan doa selama ini.
2. Bapak Prof. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D dan Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing dan dosen wali yang telah memberikan banyak ilmu dan inspirasi selama menempuh pendidikan di Teknik Kelautan.
3. Teman – teman SparTA (Grandhis, Sabilul, Rudi, dan Agung) yang selalu bekerja keras dan membantu satu sama lain hingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
4. Bapak Condro, Mas Rudi, dan Mas Dwi Hendra selaku teknisi Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS yang telah banyak sekali memberikan bantuan dan membimbing dalam eksperimen tugas akhir ini.
5. Bapak Ali Lab Hidrodinamika Indonesia yang telah membantu pengolahan data hasil eksperimen pada tugas akhir ini.
6. Yudo dan teman – teman PPNS yang telah membantu dalam pembuatan instrumen eksperimen.
7. Teman – teman pengurus Lab Hidrodinamika ITS dan Maelstrom yang selalu memberikan motivasi satu sama selama pengerjaan tugas akhir ini.
8. Teman – teman Anti Wibu dan Ukafo ITS yang selalu siap sedia menemani dan menghibur disaat penulis mengalami kejenuhan dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
9. Cengengsan, 3iji Kopi, Alpet, Coftof MERR, Si Pulung, dan tempat – tempat lainnya yang selalu menemani penulis dalam penyusunan laporan Tugas Akhir dengan kopi terbaik mereka.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
KATA PENGANTAR	v
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. LATAR BELAKANG.....	1
1.2. RUMUSAN MASALAH	4
1.3. TUJUAN	4
1.4. MANFAAT	4
1.5. BATASAN MASALAH	5
1.6. SISTEMATIKA PENULISAN	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.2. DASAR TEORI.....	8
2.2.1. SPAR	8
2.2.2. Gerak Bangunan Apung.....	10
2.2.3. Response Amplitude Operator (RAO).....	11
2.2.4 Teori Gelombang Airy	13
2.2.5. Beban Hidrodinamika	14
2.2.6. Gaya Eksitasi	15
2.2.7. Gaya Reaksi	16
2.2.8. Persamaan Gerak	19
2.2.9. Sistem Tambat (<i>Mooring System</i>).....	22
2.2.10. Pemodelan Fisik.....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	29
3.1. DIAGRAM ALIR.....	29
3.2. PENJELASAN DIAGRAM ALIR.....	34

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	47
4.1. PEMODELAN STRUKTUR	47
4.1.1. Pemodelan Numerik	47
4.1.2. Pemodelan Eksperimen.....	49
4.2. PEMODELAN TALI TAMBAT	57
4.3. VALIDASI MODEL	60
4.3.1. Validasi Model Numerik	60
4.3.2. Validasi Model Eksperimen.....	61
4.4. INSTRUMEN PENGUKURAN	66
4.4.1. Kalibrasi Gyroscope	66
4.4.2. Kalibrasi Image Processing	71
4.4.3. Kalibrasi <i>Load Cell</i>	73
4.5. RAO <i>FREE FLOATING</i>	79
4.5.1. Metode Numerik	79
4.5.2. Metode Eksperimen	81
4.5.3. Perbandingan RAO Metode Numerik dan Eksperimen.....	87
4.5.4. Perbandingan RAO SPAR <i>Helical Strakes</i> dan Tanpa <i>Helical Strakes</i>	90
4.6. RAO TERTAMBAT	93
4.6.1. Metode Numerik	93
4.6.2. Metode Eksperimen	95
4.6.3. Perbandingan RAO Tertambat Metode Numerik dan Eksperimen	100
4.6.4. Perbandingan RAO Tertambat SPAR <i>Helical Strakes</i> dan Tanpa <i>Helical Strakes</i>	103
4.7. TEGANGAN TARIK TALI TAMBAT.....	105
4.7.1. Metode Numerik	106
4.7.2. Metode Eksperimen	108
4.7.3. Perbandingan RAO <i>Tension</i> Tali Metode Numerik dan Eksperimen.....	115
4.7.4. Perbandingan RAO <i>Tension</i> Tali SPAR <i>Helical Strakes</i> dan Tanpa <i>Helical Strakes</i>	119
4.8. VARIASI SUDUT <i>MOORING LINE</i>	121
4.8.1. RAO Gerak Variasi Sudut <i>Mooring Line</i> Metode Numerik.....	121
4.8.2. <i>Tension</i> Tali Variasi Sudut <i>Mooring Line</i> Metode Numerik.....	124
4.8.3. RAO Gerak Variasi Sudut <i>Mooring Line</i> Metode Eksperimen.....	126
4.8.4. <i>Tension</i> Tali Variasi Sudut <i>Mooring Line</i> Metode Eksperimen	129

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	133
5.1. Kesimpulan.....	133
5.2. Saran	134
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Jenis – jenis SPAR	2
Gambar 1.2 Rencana <i>layout</i> eksperimen.....	3
Gambar 2.1 SPAR <i>Platform</i>	8
Gambar 2.2 Enam derajat kebebasan pada struktur terapung	11
Gambar 2.3 Bentuk umum grafis respon gerakan bangunan apung	12
Gambar 2.4 Beban hidrodinamika pada struktur	15
Gambar 2.5 Persamaan added mass untuk beberapa bentuk benda	17
Gambar 2.6 Sistem tambat tipe <i>catenary</i>	23
Gambar 2.7 Sistem tambat tipe <i>taut</i>	23
Gambar 3.1 <i>Setup</i> model tanpa tali tambat (<i>free floating</i>)	37
Gambar 3.2 <i>Setup</i> model dengan tali tambat (<i>mooring</i>)	37
Gambar 3.3 Permodelan model dengan <i>Helical Strakes</i> tampak atas.....	38
Gambar 3.4 Permodelan model dengan <i>Helical Strakes</i> tampak samping	38
Gambar 3.5 Rencana Model SPAR.....	40
Gambar 3.6 Tampak Atas Rencana Sistem Tambat pada Eksperimen	41
Gambar 3.7 Tampak Samping Rencana Sistem Tambat dan Model SPAR	42
Gambar 3.8 Tampak Atas Rencana Jangkar	42
Gambar 3.9 Diagram sistem <i>Accelero-gyro</i>	44
Gambar 3.10 Diagram sistem <i>load cell</i> yang digunakan pada eksperimen	45
Gambar 3.11 Kamera dan benda yang ditracking.....	46
Gambar 4.1 Tampak detail model numerik dengan <i>meshing</i>	48
Gambar 4.2 Tampak atas model numerik dengan <i>meshing</i>	48
Gambar 4.3 Tampak isometris model numerik dengan <i>meshing</i>	48
Gambar 4.4 Tampak depan model fisik	50
Gambar 4.5 Pemberat dan ulir di dalam lambung model fisik	50
Gambar 4.6 Desain Pemberat dan Ulir	52
Gambar 4.7 Katalog property <i>wire rope</i>	58
Gambar 4.8 Bahan tali tambat.....	59
Gambar 4.9 Skenario tes pendulum kondisi 1 perhitungan jari-jari girasi	62
Gambar 4.10 Tes pendulum kondisi 1	62
Gambar 4.11 Skenario tes pendulum kondisi 2 untuk perhitungan jari-jari girasi	63
Gambar 4.12 Tes pendulum kondisi 2	63
Gambar 4.13 Instrumen <i>gyroscope</i>	67
Gambar 4.14 Geladak dan busur	67
Gambar 4.15 <i>Gyroscope</i> pada geladak model fisik	68
Gambar 4.16 <i>Gyroscope</i> dan geladak saat proses kalibrasi	68
Gambar 4.17 <i>Ouput</i> Arduino pada arah sudut 0° derajat	68
Gambar 4.18 Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk.....	70
Gambar 4.19 Proses kalibrasi <i>image processing</i>	72
Gambar 4.20 Keluaran dari proses kalibrasi <i>image processing</i>	72
Gambar 4.21 Konfigurasi <i>load cell</i> (A), HX711 (B), dan Arduino UNO (C)	73
Gambar 4.22 Instrumen <i>load cell</i> dan arah beban.....	74

Gambar 4.23 Beban kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D), dan 50 g (E).....	74
Gambar 4.24 Grafik kalibrasi <i>load cell</i> 1	75
Gambar 4.25 Grafik kalibrasi <i>load cell</i> 2	76
Gambar 4.26 Grafik kalibrasi <i>load cell</i> 3	77
Gambar 4.27 Grafik kalibrasi <i>load cell</i> 4	78
Gambar 4.28 RAO <i>free floating</i> gerakan heave	79
Gambar 4.29 RAO <i>free floating</i> gerakan surge	80
Gambar 4.30 RAO <i>free floating</i> gerakan pitch	80
Gambar 4.31 Konfigurasi tali penahan <i>drift</i>	81
Gambar 4.32 Model SPAR kondisi <i>free floating</i> dan kode eksperimen	82
Gambar 4.33 Penempatan kamera dan lampu untuk penerangan	82
Gambar 4.34 <i>Time history</i> instrumen <i>image processing</i> untuk gerakan surge	83
Gambar 4.35 <i>Time history</i> instrumen <i>image processing</i> untuk gerakan heave	83
Gambar 4.36 <i>Time history</i> instrumen <i>gyroscope</i> untuk gerakan pitch	84
Gambar 4.37 Grafik RAO surge hasil eksperimen	85
Gambar 4.38 Grafik RAO <i>heave</i> hasil eksperimen.....	86
Gambar 4.39 Grafik RAO pitch hasil eksperimen	87
Gambar 4.40 Perbandingan RAO surge <i>free floating</i> metode numerik dan eksperimen	87
Gambar 4.41 Perbandingan RAO <i>heave free floating</i> metode numerik dan eksperimen	88
Gambar 4.42 Perbandingan RAO pitch <i>free floating</i> metode numerik dan eksperimen	89
Gambar 4.43 Perbandingan RAO surge <i>free floating</i> SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	90
Gambar 4.44 Perbandingan RAO <i>heave free floating</i> SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	91
Gambar 4.45 Perbandingan RAO pitch <i>free floating</i> SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	92
Gambar 4.46 Kondisi tertambat dalam ANSYS AQWA.....	93
Gambar 4.47 RAO tertambat gerakan surge	93
Gambar 4.48 RAO tertambat gerakan heave	94
Gambar 4.49 RAO tertambat gerakan pitch.....	94
Gambar 4.50 Konfigurasi eksperimen model fisik tertambat	95
Gambar 4.51 Eksperimen SPAR Tertambat	95
Gambar 4.52 RAO tertambat surge hasil eksperimen.....	97
Gambar 4.53 RAO tertambat <i>heave</i> hasil eksperimen	98
Gambar 4.54 RAO tertambat pitch hasil eksperimen	99
Gambar 4.55 Perbandingan RAO surge tertambat metode numerik dan eksperimen	100
Gambar 4.56 Perbandingan RAO <i>heave</i> tertambat metode numerik dan eksperimen	101
Gambar 4.57 Perbandingan RAO pitch tertambat metode numerik dan eksperimen	102
Gambar 4.58 RAO surge tertambat SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i> .	103
Gambar 4.59 RAO <i>heave</i> tertambat SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	104
Gambar 4.60 RAO pitch tertambat SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	105

Gambar 4.61 Posisi Line A, B, C, dan D	106
Gambar 4.62 Kondisi jangkar dan load cell dalam air	106
Gambar 4.63 Pemodelan tali tambat dengan menggunakan ANSYS AQWA.....	107
Gambar 4.64 RAO <i>tension</i> tali tambat A dan B metode numerik	108
Gambar 4.65 RAO <i>tension</i> tali tambat C dan D metode numerik	108
Gambar 4.66 <i>Time History load cell 1</i>	109
Gambar 4.67 <i>Time History load cell 2</i>	109
Gambar 4.68 <i>Time History load cell 3</i>	110
Gambar 4.69 <i>Time History load cell 4</i>	110
Gambar 4.70 RAO <i>tension</i> tali A metode eksperimen.....	111
Gambar 4.71 RAO <i>tension</i> tali B metode eksperimen.....	112
Gambar 4.72 RAO <i>tension</i> tali C metode eksperimen.....	113
Gambar 4.73 RAO <i>tension</i> tali D metode eksperimen.....	114
Gambar 4.74 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali A metode numerik dan eksperimen....	115
Gambar 4.75 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali B metode numerik dan eksperimen....	116
Gambar 4.76 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali C metode numerik dan eksperimen....	117
Gambar 4.77 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali D metode numerik dan eksperimen....	118
Gambar 4.78 RAO <i>tension</i> tali A-B SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	119
Gambar 4.79 Variasi sudut <i>mooring line</i>	121
Gambar 4.80 Grafik RAO surge tertambat variasi sudut <i>mooring line</i>	122
Gambar 4.81 Grafik RAO heave tertambat variasi sudut <i>mooring line</i>	123
Gambar 4.82 Grafik RAO pitch tertambat variasi sudut <i>mooring line</i>	124
Gambar 4.83 Grafik RAO <i>tension</i> line A-B variasi sudut <i>mooring line</i>	125
Gambar 4.84 Grafik RAO <i>tension</i> line C-D variasi sudut <i>mooring line</i>	126
Gambar 4.85 Perbandingan RAO surge variasi metode numerik dan eksperimen....	126
Gambar 4.86 Perbandingan RAO heave tertambat metode numerik dan eksperimen	127
Gambar 4.87 Perbandingan RAO pitch tertambat metode numerik dan eksperimen .	128
Gambar 4.88 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali A variasi metode numerik dan eksperimen	129
Gambar 4.89 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali B variasi metode numerik dan eksperimen	130
Gambar 4.90 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali C variasi metode numerik dan eksperimen	131
Gambar 4.91 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali D variasi metode numerik dan eksperimen	132

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Model to prototype multiple for the variables commonly used in mechanics under Froude scaling</i>	26
Tabel 2.2 <i>Model to prototype multiple for the variables commonly used in mechanics under Froude scaling (Lanjutan)</i>	27
Tabel 3.1.a Data Mini SPAR (Deep Oil Technology Inc., 1995)	34
Tabel 3.2 Data <i>Towing Tank</i> Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS	35
Tabel 3.3 Data Lingkungan.....	35
Tabel 3.4 <i>Properties</i> tali tambat dari <i>prototype</i> SPAR	43
Tabel 4.1 Data Dimensi Struktur Mini SPAR (Joint Industry Project, 1995).....	47
Tabel 4.2 Data Distribusi Massa Mini SPAR (<i>Joint Industry Project</i> , 1995).....	49
Tabel 4.3 Hasil Penskalaan Model SPAR.....	49
Tabel 4.4 Hasil Penimbangan Berat Material	51
Tabel 4.5 Perhitungan Momen Inersia massa PVC	52
Tabel 4. 6 Perhitungan momen inersia massa Blok A	53
Tabel 4.7 Perhitungan momen inersia massa Blok B	53
Tabel 4.8 Perhitungan momen inersia <i>topside</i>	54
Tabel 4.9 Perhitungan momen inersia massa ulir	54
Tabel 4.10 Perhitungan momen inersia massa <i>Helical Strakes</i>	55
Tabel 4.11 Posisi pusat massa dari setiap material yang dipakai.....	55
Tabel 4.12 Pusat massa model.....	55
Tabel 4.13 Jari-jari girasi model	56
Tabel 4.14 Perbandingan distribusi massa hasil skala dengan nilai target hasil perhitungan ...	56
Tabel 4.15 Properti <i>mooring line</i>	57
Tabel 4.16 Spesifikasi tali tambat eksperimen.....	58
Tabel 4.17 Spesifikasi tali tambat model fisik.....	59
Tabel 4.18 Perbandingan kekakuan <i>prototype</i> dengan data kekakuan <i>wire rope</i> acuan.....	60
Tabel 4.19 Data property tali tambat yang digunakan pada model fisik.....	60
Tabel 4.20 Perbandingan dan validasi model numerik dengan data	61
Tabel 4.21 Ukuran-ukuran yang digunakan pada pendulum test.....	64
Tabel 4.22 Periode dan frekuensi gerak pendulum model fisik kondisi 1 dan 2	64
Tabel 4.23 Validasi data prototype dan data model.....	65
Tabel 4.24 Validasi model fisik	66
Tabel 4.25 Kalibrasi searah jarum jam	69
Tabel 4.26 Kalibrasi berlawanan jarum jam	69
Tabel 4.27 Persamaan <i>trendline</i> Arduino	70
Tabel 4.28 Data Kalibrasi load cell 1	75
Tabel 4.29 Data kalibrasi <i>load cell</i> 2	76
Tabel 4.30 Data kalibrasi <i>load cell</i> 3	77
Tabel 4.31 Data kalibrasi <i>load cell</i> 4	78
Tabel 4.32 Persamaan kalibrasi keluaran <i>load cell</i> dengan beban	78
Tabel 4.33 Karakteristik Gelombang Eksperimen <i>Free Floating</i>	82
Tabel 4.34 RAO surge <i>free floating</i> metode eksperimen.....	84
Tabel 4.35 RAO heave <i>free floating</i> metode eksperimen.....	85
Tabel 4.36 RAO pitch <i>free floating</i> metode eksperimen	86
Tabel 4.37 Perbandingan RAO surge <i>free floating</i> metode numerik dan eksperimen.....	88
Tabel 4.38 Perbandingan RAO heave <i>free floating</i> metode numerik dan eksperimen	89
Tabel 4.39 Perbandingan RAO pitch <i>free floating</i> metode numerik dan eksperimen	89

Tabel 4.40 Perbandingan RAO surge <i>free floating</i> SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	90
Tabel 4.41 Perbandingan RAO heave <i>free floating</i> SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	91
Tabel 4.42 Perbandingan RAO pitch <i>free floating</i> metode numerik dan eksperimen	92
Tabel 4.43 Karakteristik Gelombang Eksperimen Tertambat.....	96
Tabel 4.44 RAO surge tertambat metode eksperimen	97
Tabel 4.45 RAO heave tertambat metode eksperimen.....	98
Tabel 4.46 RAO pitch tertambat metode eksperimen	99
Tabel 4.47 Perbandingan RAO surge tertambat metode numerik dan eksperimen	100
Tabel 4.48 Perbandingan RAO heave tertambat metode numerik dan eksperimen.....	101
Tabel 4.49 Perbandingan RAO heave tertambat metode numerik dan eksperimen.....	102
Tabel 4.50 Perbandingan RAO surge tertambat SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	103
Tabel 4.51 Perbandingan RAO surge tertambat SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	104
Tabel 4.52 Perbandingan RAO pitch tertambat SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	105
Tabel 4.53 RAO <i>tension</i> tiap tali tambat metode numerik.....	107
Tabel 4.54 RAO <i>tension</i> tali <i>load cell</i> 1 metode eksperimen	111
Tabel 4.55 RAO <i>tension</i> tali <i>load cell</i> 2 metode eksperimen	112
Tabel 4.56 RAO <i>tension</i> tali <i>load cell</i> 3 metode eksperimen	113
Tabel 4.57 RAO <i>tension</i> tali <i>load cell</i> 4 metode eksperimen	114
Tabel 4.58 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali A metode numerik dan eksperimen	115
Tabel 4.59 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali B metode numerik dan eksperimen.....	116
Tabel 4.60 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali C metode numerik dan eksperimen.....	117
Tabel 4.61 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali D metode numerik dan eksperimen	118
Tabel 4.62 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali A-B SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	119
Tabel 4.63 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali C-D SPAR <i>helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	120
Tabel 4.64 Perbandingan RAO gerak surge variasi	122
Tabel 4.65 RAO heave tertambat variasi sudut <i>mooring line</i>	123
Tabel 4.66 RAO pitch tertambat variasi sudut <i>mooring line</i>	123
Tabel 4.67 RAO <i>tension</i> tali A-B variasi sudut <i>mooring line</i>	124
Tabel 4.68 RAO <i>tension</i> tali C-D variasi sudut <i>mooring line</i>	125
Tabel 4.69 Perbandingan RAO surge tertambat metode numerik dan eksperimen	127
Tabel 4.70 Perbandingan RAO heave tertambat metode numerik dan eksperimen.....	128
Tabel 4.71 Perbandingan RAO pitch tertambat metode numerik dan eksperimen	128
Tabel 4.72 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali A variasi metode numerik dan eksperimen	130
Tabel 4.73 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali B variasi metode numerik dan eksperimen	130
Tabel 4.74 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali C variasi metode numerik dan eksperimen	131
Tabel 4.75 Perbandingan RAO <i>tension</i> tali D variasi metode numerik dan eksperimen	132

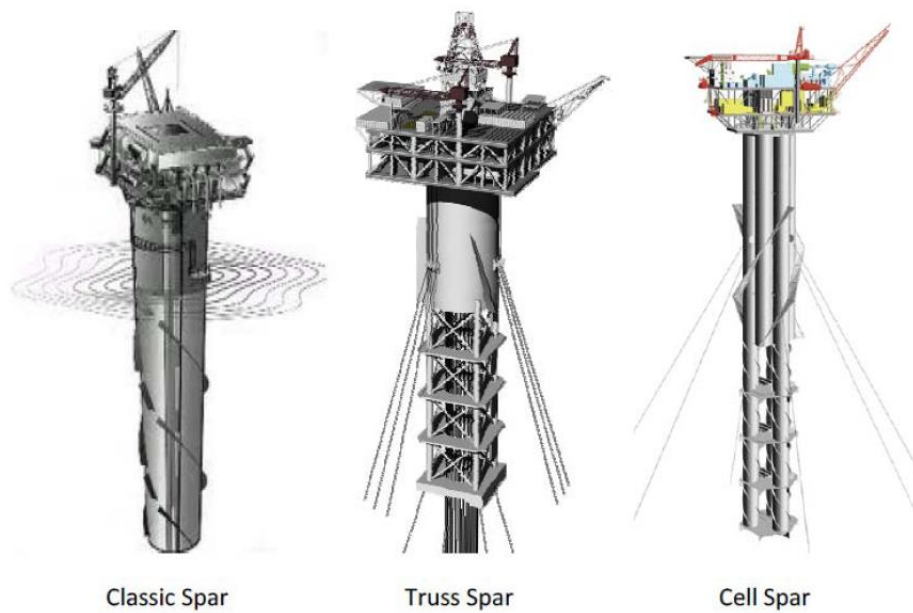
BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Beberapa dekade terakhir kebutuhan akan energi terus meningkat terutama kebutuhan energi fosil (minyak dan gas) (Islam, et al., 2012). Semakin meningkatnya kebutuhan akan energi mengakibatkan berkurangnya cadangan minyak bumi yang ada di darat sehingga eksploitasi minyak bumi beralih ke lepas pantai bahkan sampai pada laut yang dalam (Stendal., 2015). Untuk menghadapi lingkungan perairan yang lebih dalam, maka bangunan laut yang akan dioperasikan adalah jenis-jenis yang dianggap efektif dari segi biaya, seperti jenis-jenis anjungan apung. Anjungan lepas pantai untuk *Floating Offshore Structure* sendiri terdapat *TLP platform*, *semisubmersible platform*, *floating production system*, dan juga *SPAR platform* (Chakrabarti, 2005).

SPAR adalah compliant floating structure digunakan sebagai fasilitas pengeboran, produksi, dan penyimpanan minyak dan gas (Kurian, et al., 2012). Terdapat empat jenis SPAR platform yaitu classic, truss, cell dan cell-truss SPAR (Islam, et al., 2012). SPAR digunakan pertama kalinya sebagai unit penyimpanan di Ladang Brent pada tahun 1976 dan sebagai *loading platform* untuk Ladang Draugen di lepas pantai Norway. Pada tahun 1996, SPAR baru digunakan untuk kegiatan produksi hidrokarbon. Pada waktu itu, struktur utama SPAR yang berbentuk silinder (*hull*) terdiri dari tiga bagian yakni *hard tank* yang terletak dekat dengan *top side*, *void* dan *free flooding* pada bagian tengah, dan *soft tank* pada bagian bawah (Chakrabarti, 2005). SPAR merupakan salah satu bangunan apung yang telah digunakan untuk mengakomodasi sistem *dry tress* dikarenakan SPAR memiliki gerakan *heave* dan *pitch* yang kecil sehingga *riser* dapat berfungsi secara aman dan ekonomis dengan dukungan *floater* (Wang, 2012).

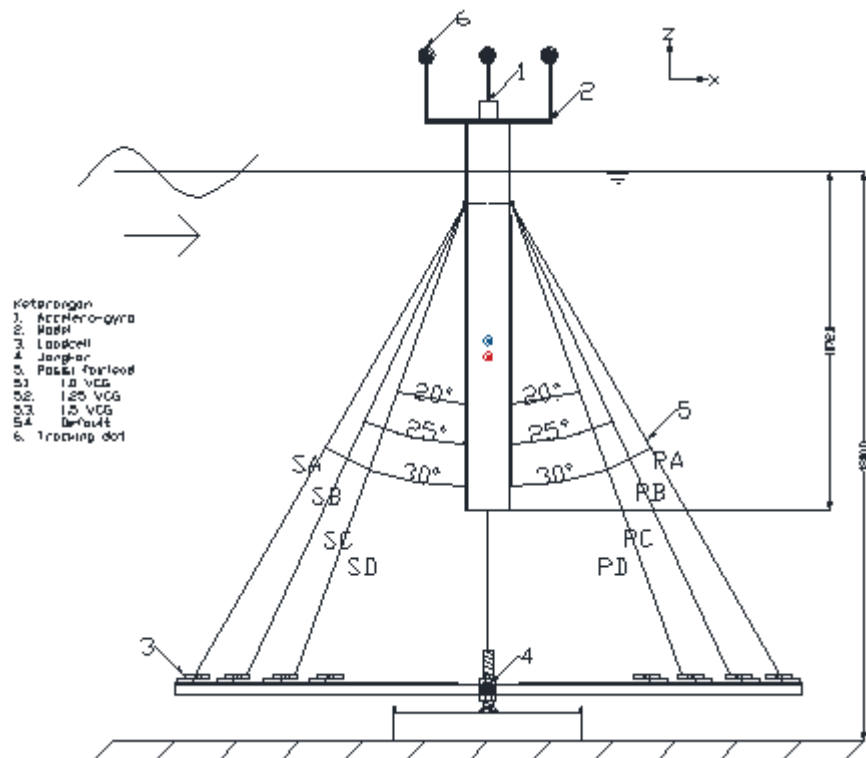


Gambar 1.1 Jenis – jenis SPAR

(Agarwal & Jain, 2003)

Konsep stabilitas SPAR berasal dari titik pusat massa (*center of gravity*) struktur yang berada di bawah titik pusat *buoyancy* (*center of buoyancy*). Selain itu, SPAR memiliki *waterplane area* yang kecil sehingga mengurangi efek dari gaya gelombang yang terjadi dan cocok untuk beroperasi di *rough seas* (Sinpyo et al., 2015). Seperti bangunan apung lainnya, SPAR juga menerima beban lingkungan dimana sebesar 70% dari respon struktur diakibatkan oleh beban gelombang (Kurian, et al., 2012). Beban lingkungan yang diterima SPAR mengakibatkan struktur SPAR mengalami respon translasi dan rotasi. Respon yang terjadi berdasarkan pada kekakuan struktur yang terdiri dari *restoring forces* akibat hidrostatis untuk gerakan *heave*, *roll*, dan *pitch*; dan *restoring force* dari sistem tambat yang digunakan (Agarwal & Jain, 2003). Salah satu jenis sistem tambat adalah *spread mooring*, dimana *spread mooring* terbagi atas 3 jenis yakni *taut-leg mooring system*, *semi taut-leg catenary mooring system* dan *catenary mooring* (Kim, 2012). Tali tambat yang biasanya digunakan berupa *heavy chain*, *steel wire ropes* dan/atau *synthetic polyester ropes* yang dihubungkan ke jangkar di dasar laut (Stendal, 2015).

Pada penelitian Jaelani (2008) mengenai eksperimen perbandingan pengaruh sistem tambat *taut* dan *catenary* terhadap respon gerakan SPAR tipe *classic*, hasil dari gerakan SPAR pada sistem tambat *catenary* relatif lebih besar daripada sistem tambat *taut*. Selanjutnya dalam tugas akhir ini akan dilakukan studi numerik dan eksperimen respon gerakan SPAR *heave*, *pitch*, dan *surge*, serta dinamika tegangan *mooring line* dengan tiga variasi sudut *mooring line* pada satu ketinggian *fairlead*. Rancangan variasi sudut mooring line tersebut ditunjukkan oleh gambar 1.2.



Gambar 1.2 Rencana *layout* eksperimen

1.2. RUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini diantaranya:

1. Bagaimana *Response Amplitude Operator* (RAO) gerakan *heave*, *pitch*, dan *surge* pada SPAR *Helical Strakes* ketika keadaan terapung bebas ditinjau secara numerik dan eksperimen?
2. Bagaimana *Response Amplitude Operator* (RAO) gerakan *heave*, *pitch*, dan *surge* pada SPAR *Helical Strakes* ketika keadaan tertambat dengan tiga variasi sudut *mooring line* pada satu ketinggian *fairlead* ditinjau secara numerik dan eksperimen?
3. Bagaimana tegangan *mooring line* SPAR *Helical Strakes* yang dihasilkan dari keadaan tertambat dengan tiga variasi sudut *mooring line* ditinjau secara numerik dan eksperimen?

1.3. TUJUAN

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini diantaranya:

1. Menghitung *Response Amplitude Operator* (RAO) gerakan *heave*, *pitch*, dan *surge* SPAR *Helical Strakes* ketika keadaan terapung bebas ditinjau secara numerik dan eksperimen.
2. Menghitung *Response Amplitude Operator* (RAO) gerakan *heave*, *pitch*, dan *surge* pada SPAR *Helical Strakes* ketika keadaan tertambat dengan tiga variasi sudut *mooring line* pada satu ketinggian *fairlead* ditinjau secara numerik dan eksperimen.
3. Menghitung tegangan *mooring line* SPAR *Helical Strakes* yang dihasilkan dari keadaan tertambat dengan tiga variasi sudut *mooring line* ditinjau secara numerik dan eksperimen.

1.4. MANFAAT

Manfaat tugas akhir ini adalah memberikan informasi hasil analisis kepada semua peneliti tentang karakteristik gerakan dan tegangan tali tambat SPAR *Helical Strakes* akibat beban gelombang dengan variasi sudut *mooring line* dengan satu ketinggian *fairlead* yang ditinjau secara numerik dan eksperimen.

1.5. BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang digunakan adalah:

1. Pemodelan struktur dilakukan dengan pemodelan fisik.
2. Pemodelan fisik struktur dipersiapkan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan menyesuaikan kedalaman maksimum *towing tank* $\pm 1,8$ m.
3. Beban yang dipertimbangkan hanya beban gelombang.
4. Arus diabaikan
5. Gelombang yang digunakan pada eksperimen adalah gelombang reguler.
6. Teori gelombang yang digunakan adalah Teori Gelombang Airy.
7. Arah gelombang hanya mempertimbangkan gelombang dengan sudut datang 0° .
8. Gerakan struktur yang ditinjau adalah *heave*, *surge*, dan *pitch*.
9. Efek hidrodinamika dari sub-struktur tidak diperhitungkan.
10. Interaksi sistem tambat dengan tanah diabaikan.
11. Studi numerik dan eksperimen menggunakan sistem tambat *taut* berjumlah 4 *lines*.

1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan laporan tugas akhir dijelaskan oleh uraian berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini meliputi penjelasan tentang latar belakang disusunnya tugas akhir, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan laporan tugas akhir.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini meliputi penjelasan mengenai landasan teori yang mendukung penulis dalam menyelesaikan analisis pada tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini meliputi penjelasan tentang sistematis pengerjaan tugas akhir ini berupa diagram alir atau *flow chart* yang disusun secara sistematis dan mendeskripsi setiap langkah dalam pengerjaan tugas akhir ini.

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini meliputi pembahasan mengenai pemodelan fisik dan numerik, serta perbandingan hasil gerak SPAR antara dua pemodelan tersebut dan juga validasinya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini meliputi kesimpulan dari analisis serta saran berdasarkan hasil dari tugas akhir yang telah dicapai.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. TINJAUAN PUSTAKA

SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) adalah jenis anjungan lepas pantai terapung yang bersifat lentur yang biasanya digunakan untuk proses pengeboran, produksi, pemrosesan, maupun penyimpanan minyak dan gas alam pada perairan dalam (Kurian, et al., 2012). Jika dibandingkan dengan platform lainnya, penggunaan SPAR pada perairan dalam lebih ekonomis dan efisien untuk pengeboran, produksi, proses, dan sebagai penyimpanan (Islam, et al., 2012). SPAR memiliki bentuk geometri silinder vertikal dengan sarat yang sangat besar. Konsep stabilitas bangunan SPAR ialah dengan menempatkan titik *center of gravity* (COG) berada di bawah titik *center of buoyancy* (COB). Hal itu membuat bangunan SPAR lebih stabil dan respon gerakan *heave* dari bangunan ini tereduksi sehingga memungkinkan untuk dijadikan fasilitas penyimpanan minyak. SPAR juga dilengkapi dengan sistem tambat untuk membatasi gerakan pada enam derajat kebebasan (Barltrop, 1996).

Banyak peneliti telah melakukan kajian dan penelitian untuk mengurangi dampak dari beban lingkungan terhadap SPAR. Pada penelitian Jaelani (2008), dilakukan kajian eksperimental mengenai perbandingan pengaruh sistem tambat *taut* dan *catenary* terhadap gerakan SPAR tipe klasik akibat beban gelombang. Hasil dari kajian tersebut ialah respon gerakan SPAR dengan sistem tambat *catenary* lebih besar dari *taut* (Jaelani, 2008).

Selain itu, Sinpyo et al (2013) dalam penelitiannya melakukan eksperimen pengaruh dari variasi titik berat, kekakuan mooring system dan lokasi fairlead model SPAR terhadap gelombang regular. Dari hasil test terhadap gelombang regular didapatkan RAO gerakan pitch dan tegangan tali tambat berkurang seiring dengan bertambahnya frekuensi gelombang, gerakan pitch menjadi kecil ketika metacenter kecil. Sedangkan pada RAO pitch, metacenter yang besar menurun lebih cepat dibandingkan metacenter yang lebih kecil ketika

frekuensi gelombang meningkat. Selain itu, tegangan tali tambat meningkat ketika kekakuan, lokasi fairlead, dan titik berat bertambah.

Selanjutnya Qinwei Ding dkk (2017) memodelkan sebuah SPAR *wind turbine* yang dilengkapi dengan *Helical Strakes* dan kemudian model tersebut diberi beban angin, gelombang, dan arus. Setelah itu dilakukan analisis respon dinamis dari SPAR tersebut dan hasilnya dalam bentuk RAO *surge*, *heave* dan *pitch*, dimana hasilnya menunjukkan *Helical Strakes* mampu mengurangi respon gerakan SPAR *wind turbine* pada *heave* dan *pitch* secara signifikan (Qinwei Ding, et al., 2017).

2.2. DASAR TEORI

2.2.1. SPAR

Menurut Kurian (2012), SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) adalah jenis floating deepwater platform yang digunakan pada wilayah ultra deep water. Strukturnya didesain berupa silinder terapung yang relatif besar dengan diameter berukuran puluhan meter dan panjang struktur mencapai lebih dari ratusan meter menyesuaikan dengan kedalaman laut tempat beroperasi (Chakrabarti, 2005). Konsep stabilitas SPAR yakni dengan menempatkan titik gravitasi dari SPAR di bawah titik gaya apung (buoyancy).



Gambar 2.1 SPAR Platform

Menurut Sirmivas (2003), SPAR terdiri dari tiga sistem utama yakni:

1. Torside

Bangunan atas merupakan struktur multi-level yang dapat dikonfigurasi untuk pengeboran penuh, workover, produksi, atau kombinasi dari fungsi tersebut.

2. Hull

Lambung terdiri dari tiga bagian

- a. Hard Tank

Merupakan kompartemen silinder bagian atas dari hull yang menyediakan fasilitas flotasi. Fasilitas flotasi merupakan variabel seawater ballast yang berfungsi untuk mengangkat bagian hard tank tetap di atas sarat air. Selain itu, juga berfungsi dalam skema variasi draft dan trim akibat dari gaya-gaya yang berasal dari topside dan gaya-gaya lainnya.

- b. Mid Tank

Merupakan perpanjangan dari hard tank dari batas sarat air ke bawah dan juga merupakan ballast tetap (fixed ballast). Ballast tetap berfungsi untuk menjaga titik berat struktur SPAR selalu berada di bawah titik buoyancy.

- c. Soft Tank

Merupakan bagian bawah hull yang menyediakan flotasi pada keel untuk float-off, horizontal wet tow, dan kompartemen pemberat tetap. Konfigurasi keseluruhan dari hard tank, mid tank, dan soft tank menghasilkan gerakan heave struktur yang sangat rendah dalam kondisi operasi cuaca ekstrim.

3. Mooring

Merupakan sistem penambatan yang digunakan untuk menjaga stabilitas dari SPAR. Terdiri dari anchor, wire rope atau fibre rope, dan platform chain.

Menurut Agarwal (2003), struktur SPAR generasi sekarang memiliki beberapa kelebihan antara lain:

1. Mampu beroperasi sampai kedalaman air 3000 m untuk kegiatan pengeboran dan produksi
2. Mampu menopang beban bangunan atas (topside) yang besar
3. Penggunaan riser untuk produksi berada di tengah centre well
4. Selalu stabil karena titik Center of Bouyancy (CoB) berada di atas titik Center of Gravity (CoG)
5. Jika dibandingkan dengan struktur terapung lainnya, SPAR lebih baik dalam mentolerir berbagai gerakan
6. Bagian lambung terbuat dari beton atau baja
7. Memiliki sistem mooring yang mudah untuk diinstal, dioperasikan, dan dipindahkan

2.2.2. Gerak Bangunan Apung

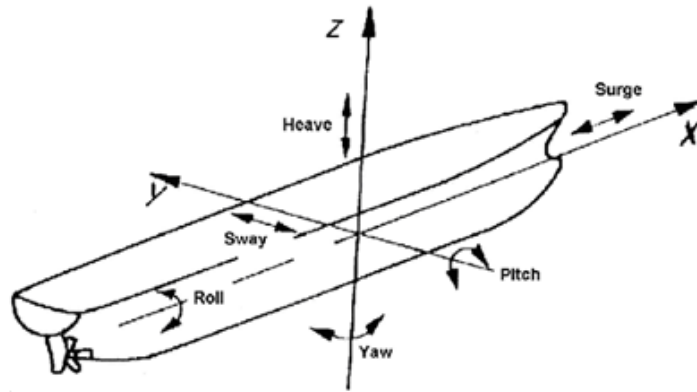
Pada dasarnya benda yang mengapung mempunyai 6 mode gerakan bebas (*Six Degree of Freedom*) seperti pada gambar 2.2, 6 mode gerakan bebas tersebut terbagi menjadi dua kelompok, yaitu: 3 mode gerakan translasi dan 3 mode gerakan rotasional. Berikut adalah ke-6 mode gerakan tersebut:

Mode gerakan translasi:

- a. Surge, gerakan transversal arah sumbu x
- b. Sway, gerakan arah sumbu y
- c. Heave, gerakan transversal arah sumbu z

Mode gerakan rotasional

- a. Roll, gerakan rotasional arah sumbu x
- b. Pitch, gerakan rotasional arah sumbu y
- c. Yaw, gerakan rotasional arah sumbu z



Gambar 2.2 Enam derajat kebebasan pada struktur terapung
(Engineering Library, 2011)

2.2.3. Response Amplitude Operator (RAO)

RAO (Respon Amplitude Operator) merupakan respon dinamis struktur yang diakibatkan gelombang dengan rentang frekuensi tertentu. RAO merupakan alat untuk mentransformasikan beban gelombang menjadi respon dinamis struktur. Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (\text{m/m}) \quad (2.1)$$

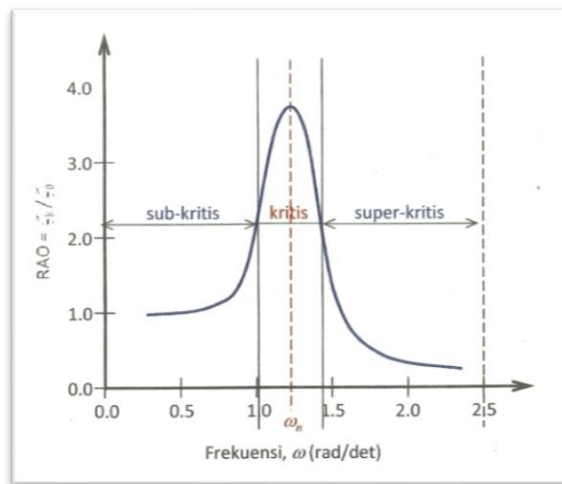
dengan:

$\zeta_{k0}(\omega)$ = amplitudo struktur

$\zeta_0(\omega)$ = amplitudo gelombang

Respon gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) (Djarmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sama dengan persamaan 2.1 di atas. Sedangkan untuk respon gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang ($k_w = \omega^2/g$) dengan amplitudo gelombang insiden (Djarmiko, 2012):

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{k_w \zeta_0(\omega)} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2 / g) \zeta_0} (\text{rad/rad}) \quad (2.2)$$



Gambar 2.3 Bentuk umum grafis respon gerakan bangunan apung
(Djarmiko, 2012)

Berdasarkan Gambar 2.3, kurva respon gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian:

- Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau $\omega^2 < k/(m+a)$, gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan (Djarmiko, 2012).
- Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respon gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang. Secara hidrodinamis di daerah frekuensi alami, yakni $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor redaman (Djarmiko, 2012).
- Ketiga adalah daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini respon

gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Oleh karena itu gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana $\omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djarmiko, 2012).

2.2.4 Teori Gelombang Airy

Teori gelombang *airy* atau teori gelombang *linear* merupakan persamaan gelombang yang diperoleh dengan mengasumsikan kondisi dasar laut yang rata dan batas horizontal permukaan yang tak berhingga. Gelombang *airy* merupakan teori gelombang yang paling sering digunakan karena gelombang yang terjadi di laut identik dengan persamaan gelombang *airy*. Amplitudo dari gelombang *airy* sangat kecil bila dibandingkan dengan panjang gelombang dan kedalaman laut. Untuk periode dianggap memiliki nilai yang konstan. Nama teori gelombang *airy* berasal dari Sir George Biddell Airy (1845) selaku penemu dari teori ini, adapun persamaan dari teori gelombang ini adalah sebagai berikut:

- Kecepatan Potensial

$$(\phi)(x,z,d,t) = \frac{g\zeta_0}{\omega} e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.3)$$

- Kecepatan Fluida

$$\dot{u} = -\frac{g\zeta_0}{\omega} k e^{kz} \cos(\omega t - kx) \quad (2.4)$$

- Percepatan Fluida

$$\ddot{u} = g\zeta_0 k e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.5)$$

dengan,

ζ_0 = amplitudo gelombang
 ω = frekuensi alami gelombang
 k = angka gelombang
 d = kedalaman laut

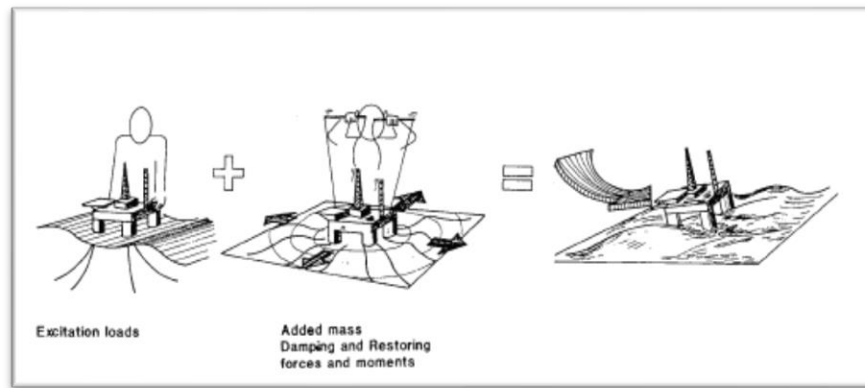
Adapun asumsi yang dari teori gelombang Airy adalah sebagai berikut :

1. Amplitudo gerakan relatif kecil jika dibandingkan dengan panjang gelombang.
2. Permukaan dasar laut datar dan *impermeable* sehingga kecepatan arah vertikal sama dengan 0.
3. Gaya *coriolis* diabaikan.
4. Tekanan pada permukaan air adalah *uniform* dan konstan.
5. Fluida dianggap *irrational*, homogen, *incompressible* dan *non-viscosity*.

2.2.5. Beban Hidrodinamika

Suatu struktur terapung akan menerima beban hidrodinamika. Beban hidrodinamika yang diterima oleh struktur terapung dapat dijelaskan sebagai 2 sub-masalah, sebagai berikut:

1. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat benda ditahan untuk berosilasi yang berada serta menerima gelombang datang. Beban ini disebut sebagai beban akibat eksitasi gelombang. Beban ini secara umum terdiri dari gaya tekanan (yang biasa disebut Froude Krylov *Force*) dan gaya difraksi.
2. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat struktur digetarkan dengan frekuensi yang sama dengan gaya eksitasi gelombang yang datang. Namun, pada kali ini, tidak ada gelombang yang mengenai struktur. Beban hidrodinamika yang didapat dari sub masalah ini adalah beban massa tambah (*added mass*), beban redaman (*damping*) dan beban kekakuan (*restoring force*). Beban ini bisa juga dianggap sebagai beban reaksi akibat pergerakan struktur (Faltinsen, 1990).



Gambar 2.4 Beban hidrodinamika pada struktur

(Sea Loads on Ships and Offshore Structures, 1990)

Sub masalah 1 dan 2 tersebut dapat dihubungkan secara linear sehingga gaya hidrodinamik total pada struktur terapung merupakan penjumlahan sub-masalah 1 dan sub-masalah 2.

2.2.6. Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi yang diterima dari struktur terjadi akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak merata ini disebut sebagai gaya Froude-Krylof. Selain itu, pada struktur dengan ukuran yang cukup besar, keberadaan struktur juga akan menyebabkan perubahan distribusi tekanan. Efek dari perubahan distribusi tekanan akibat adanya struktur yang besar ini disebut dengan gaya difraksi. Gaya Froude-Krylof dapat dicari menggunakan persamaan (2.6).

$$F_{FK_i} = \int p n_i dA \quad (2.6)$$

dengan,

p = Tekanan gelombang untuk perairan dalam sesuai dengan persamaan (2.7)

n_i = Vektor satuan arah luasan kecil

dA = Luasan kecil struktur

Persamaan (2.6) menghubungkan antara distribusi tekanan yang diakibatkan medan gelombang dengan luas permukaan dari struktur. Distribusi tekanan gelombang di laut dalam untuk struktur didapat dengan menggabungkan

persamaan potensial gelombang dengan persamaan berneouli sehingga didapat persamaan (2.7). Sedangkan gaya difraksi pada struktur terapung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks.

$$p = \rho g \zeta_a e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.7)$$

dengan,

ρ = Massa jenis air sekitar struktur

g = Percepatan gravitasi

ζ_a = Amplitudo gelombang

k = Angka gelombang

z = Posisi di sumbu vertikal, dengan nilai 0 di permukaan air

ω = Percepatan sudut gelombang

t = Waktu

x = Posisi di sumbu horizontal, searah dengan arah gelombang

2.2.7. Gaya Reaksi

Gaya reaksi pada struktur dipengaruhi *added mass*, redaman dan kekakuan. Berikut penjelasan masing-masing komponen tersebut.

a. Massa / displacement SPAR

Massa struktur SPAR bisa dapat dihitung dengan cara mengalikan massa jenis dengan volume struktur yang tercelup. Perhitungan massa struktur dapat didapatkan dengan persamaan 2.8

$$m = p\pi r^2 T \quad (2.8)$$

dengan,

m = Massa struktur SPAR (ton)

p = Massa jenis air (ton/m³)

r = Jari jari SPAR (m)

T = Sarat struktur SPAR (m)

b. *Added Mass*

Dalam eksperimen yang dilakukan Bessel (1828) mengenai osilasi berbentuk pendulum di air dan di udara, ia menemukan bahwa walaupun dengan massa pendulum yang sama, pendulum yang di dalam air mempunyai massa yang lebih besar daripada pendulum yang di udara. Perbedaan massa inilah yang kemudian Bessel menginterpretasikannya sebagai masa tambah (*added mass*).

Sebenarnya tidak ada massa yang ditambahkan ke dalam sistem, efek penambahan massa ini diakibatkan oleh ikut Bergeraknya fluida di sekitar benda terapung. Pergerakan fluida tersebut menambah energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda maka akan menghasilkan komponen massa. Massa inilah yang dianggap sebagai massa tambah. Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak (Sarpkaya, 1981).

Persamaan (2.9) merupakan formula dari gaya masa tambah, dimana merupakan perkalian antara massa tambah dengan percepatan gerak benda terapung. Sarpkaya menemukan beberapa nilai masa tambah (a) untuk beberapa bentuk sederhana. Untuk gerak silinder, dengan beberapa orientasi dapat dilihat pada gambar 2.5



$$F_a = a_i \ddot{\xi}_i \quad (2.9)$$

dengan,

i = Mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

a = Koefisien massa tambah

$\ddot{\xi}$ = Respon percepatan gerak struktur

	SHAPE	ADDED MASS
		PER UNIT LENGTH
		MOTION
	CIRCLE	$\rho \pi c^2$
	CIRCULAR DISK	$\frac{8}{3} \rho c^3$

Gambar 2.5 Persamaan added mass untuk beberapa bentuk benda

c. Redaman

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur. Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk benda dan mode gerak benda. Sebagai gaya reaksi, gaya ini mempunyai persamaan (2.10). Persamaan ini merupakan perkalian antara redaman benda dengan kecepatan gerak benda. Nilai redaman dapat dicari dengan menggunakan analisis numerik (Chakrabakti, 2005).

$$F_b = b_i \dot{\xi}_i \quad (2.10)$$

dengan,

i = Mode gerak struktur dengan

1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

b = Nilai redaman sistem

$\dot{\xi}$ = Respon kecepatan gerak struktur

d. Kekakuan

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, tanpa gelombang, struktur tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini hanya terjadi pada 3 mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak *heave* (ξ_{33}), *pitch* (ξ_{44}) dan *roll* (ξ_{55}). Gaya ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatik struktur. Gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda disebut gaya pengembali (*restoring force*) yang mempunyai persamaan (2.11). Persamaan ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak.

$$F_c = c_i \xi_i \quad (2.11)$$

dengan,

i = Mode gerak struktur dengan

1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

c = Kekakuan struktur
 ξ = Respon posisis gerak struktur

Nilai c dari *heave*, *roll* dan *pitch* adalah sebagai berikut :

$$c_3 = \rho g A_{wp} \quad (2.12)$$

$$c_4 = \rho g V \overline{GM_T} \quad (2.13)$$

$$c_5 = \rho g V \overline{GM_L} \quad (2.14)$$

dengan,

ρ = Massa jenis air sekitar struktur

g = Percepatan gravitasi struktur

A_{wp} = Luas permukaan di garis air

V = Volume displacement struktur

$\overline{GM_T}$ = Jarak metacentre melintang

$\overline{GM_L}$ = Jarak metacentre memanjang

2.2.8. Persamaan Gerak

Gerak dari bangunan apung dapat dianalisis menggunakan hukum II Newton yaitu:

$$\sum F = m_i \ddot{\xi}_i \quad (2.15)$$

dengan,

i = Mode gerak struktur dengan

1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)

$\sum F$ = Resultan gaya

m = Massa struktur

$\ddot{\xi}$ = Percepatan struktur

Persamaan (2.15) menunjukkan hubungan antara resultan gaya dengan massa benda dan percepatan benda. Resultan gaya untuk benda terapung merupakan pengurangan gaya aksi dengan gaya reaksi. Hal ini dikarenakan gaya aksi (gaya eksitasi) memberi gaya kepada struktur sedangkan gaya reaksi merupakan gaya yang dilakukan oleh struktur (persamaan 2.16)

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (2.16)$$

$$\sum F = F_{eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \quad (2.17)$$

Dengan memasukkan pengertian gaya eksitasi dan gaya reaksi pada struktur terapung yang terkena gelombang, maka persamaan 2.16 dapat dikembangkan menjadi persamaan 2.17. Dengan,

$$\begin{aligned} \sum F &= \text{Resultan gaya} \\ F_{eksitasi} &= \text{Gaya eksitasi gelombang} \\ F_a &= \text{Gaya inersia} \\ F_b &= \text{Gaya redaman} \\ F_c &= \text{Gaya pengembali} \end{aligned}$$

Dengan memasukkan persamaan (2.9, 2.10, dan 2.11) ke persamaan (2.18; 2.19) maka didapat :

$$m_i \ddot{\xi}_i = F_{eksitasi} - (a_i \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i) \quad (2.18)$$

$$(m_i + a_i) \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i = F_{eksitasi} \quad (2.20)$$

dengan,

i = Mode gerak struktur dengan
1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)

$F_{eksitasi}$ = Gaya eksitasi gelombang

m = Massa struktur

a = Koefisien massa tambah

$\ddot{\xi}$ = Respon percepatan gerak struktur

b = Nilai redaman sistem

$\dot{\xi}$ = Respon kecepatan gerak struktur

c = Kekakuan struktur

ξ = Respon posisi gerak struktur

Persamaan (2.20) merupakan persamaan yang tidak memperhatikan gerak kopel bangunan. Dalam pengertian itu, setiap mode gerak tidak mempengaruhi gerak benda yang lain. Di sisi lain, gerak couple adalah

persamaan gerak yang setiap geraknya bisa saling mempengaruhi gerak yang lainnya. Menurut Djatmiko (1992), persamaan gerak couple untuk kondisi terapung dapat direpresentasikan dalam bentuk matriks, dengan persamaan 2.21

$$\sum_{n=1}^6 \left[(M_{jk} + A_{jk}) \ddot{\xi}_k + B_{jk} \dot{\xi}_k + C_{jk} \xi_k \right] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \quad (2.21)$$

dengan:

M_{jk} = komponen matriks massa kapal

A_{jk}, B_{jk} = matriks koefisien massa tambah dan redaman

C_{jk} = koefisien-koefisien gaya hidrostatik pengembali

F_j = amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks

F1, F2, dan F3 adalah amplitudo gaya-gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge*, *sway*, dan *heave*. Sedangkan F4, F5, dan F6 adalah amplitudo momen eksitasi untuk *roll*, *pitch*, dan *yaw*.

Pada kasus bangunan apung yang tertambat persamaan gerak menjadi persamaan 2.22 (Chen, 2011)

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (\delta_{nm} \mathbf{M}_{jk}^{nm} + \mathbf{A}_{jk}^{nm}) - i\omega \mathbf{B}_{jk}^{nm} + \delta_{nm} \mathbf{C}_{jk}^{nm} + \mathbf{C}_{jk}^{*nm} \right] \xi_j = \mathbf{F}_j^n \quad (2.22)$$

dengan,

n = 1, 2, 3...M menunjukkan jumlah nth struktur,

δ_{nm} = symbol Kronecker delta, mempunyai nilai 0 jika $n \neq m$ dan 1 jika $n = m$, sehingga \mathbf{M}_{jk}^{mm} and \mathbf{C}_{jk}^{mm} adalah matriks inersia dan hidrostatik dari bangunan m^{th}

\mathbf{A}_{jk}^{nm} = matriks massa tambah untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks massa tambah bangunan m^{th} akibat bangunan n^{th} ($n \neq m$),

\mathbf{B}_{jk}^{nm} = matriks redaman hidrodinamika untuk bangunan m^{th} akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks redaman hidrodinamika m^{th} akibat bangunan n^{th} saat ($n \neq m$),

\mathbf{C}_{jk}^{*nm} = matrik kekakuan untuk bangunan mth akibat gerak bangunan sendiri ($n = m$), dan matriks kekakuan mth akibat bangunan nth saat ($n \neq m$),

\mathbf{F}_j^n = matriks gaya eksitasi pada bangunan nth.

Berdasarkan Van Malree dan Van Boom (1991), komponen eksitasi terdiri dari gaya gelombang orde 1 ($\mathbf{F}_{j-wv}^{n(1)}$), gaya gelombang orde 2 ($\mathbf{F}_{j-wv}^{n(2)}$), arus (\mathbf{F}_{j-c}^n), angin (\mathbf{F}_{j-w}^n), mesin pendorong (\mathbf{F}_{j-th}^n) dan sistem control lainnya (\mathbf{F}_{j-ct}^n) seperti sirip penstabil (*stabilizing fins*). Sehingga matriks gaya eksitasi menjadi

$$\mathbf{F}_j^n = \mathbf{F}_{j-wv}^{n(1)} + \mathbf{F}_{j-wv}^{n(2)} + \mathbf{F}_{j-c}^n + \mathbf{F}_{j-w}^n + \mathbf{F}_{j-th}^n + \mathbf{F}_{j-ct}^n \quad (2.23)$$

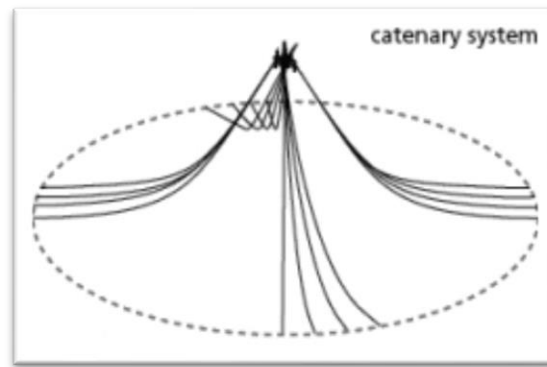
2.2.9. Sistem Tambat (*Mooring System*)

Sistem tambat (*mooring system*) pada struktur terapung lepas pantai seperti SPAR, TLP, Kapal dan lain-lain berfungsi untuk menjaga posisi struktur supaya tetap berada pada posisinya terhadap gaya-gaya yang bekerja seperti angin, arus dan gelombang ketika beroperasi. Secara garis besar, konfigurasi sistem tambat pada SPAR berupa jenis tambat menyebar (*spread mooring*) yang terdiri dari *catenary mooring* atau *taut mooring*. Sistem tambat pada umumnya terdiri dari sejumlah *lines* yang terbuat dari *chain*, kabel (*wire*), atau tali sintetik (*syntetic rope*). Bagian atas dari *mooring line* ini dipasang pada badan struktur terapung di titik-titik yang berbeda sedangkan bagian bawah *mooring line* nya ditambatkan ke dasar laut. Kabel-kabel *mooring* terangkai dari rantai baja (*steel chain*), tali ataupun kombinasi dari keduanya. Gaya *tension* yang terjadi pada kabel tergantung dari berat kabel, *property* elastisitasnya sendiri dan sistem tambatnya.

Tipe-tipe dari sistem tambat pada struktur bangunan apung lepas pantai utamanya SPAR adalah sebagai berikut :

- *Catenary Line Mooring*

Merupakan sistem tambat pertama yang paling umum. Ketika berada di dasar laut posisi *mooring* horizontal sehingga pada *catenary mooring* ini jangkar hanya dikenakan beban horizontal. Pada *catenary mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri.

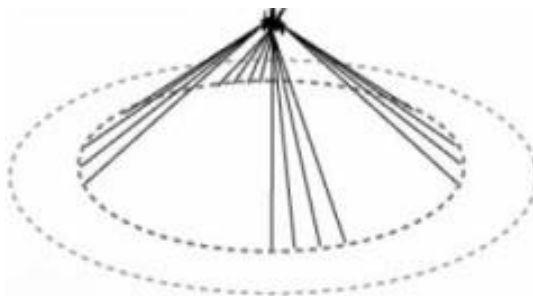


Gambar 2.6 Sistem tambat tipe *catenary*

(abc-moorings.weebly.com/mooring-systems.html)

- *Taut Mooring System*

Sistem tambat ini memiliki konfigurasi *mooring lines* dengan tali yang tegang. Perbedaan utamanya dengan *catenary mooring* adalah posisi *anchorleg*. *Taut mooring* ketika berada di dasar laut posisi *mooring* nya bersudut sehingga jangkar harus mampu menahan beban yang terjadi baik beban horizontal maupun vertikal. Pada *taut mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri. Keuntungan dari *taut mooring* jika dibandingkan dengan *catenary mooring* adalah radius tambatannya lebih kecil.



Gambar 2.7 Sistem tambat tipe *taut*

(<http://abc-moorings.weebly.com/mooring-systems.html>)

2.2.10. Pemodelan Fisik

Dalam merancang atau mendesain suatu bangunan laut digunakan beberapa metode salah satunya adalah pemodelan fisik. Pemodelan fisik ini dianggap lebih dapat mempresentasikan konfigurasi dari struktur yang sebenarnya jika dibandingkan dengan pemodelan numerik. Sehingga, untuk hasil analisis diperoleh dari hasil pemodelan fisik cenderung digunakan sebagai validasi terhadap hasil dari analisis numerik maupun analisis perhitungan yang lain.

Pemodelan fisik memiliki beberapa kelebihan (Chakrabarti, 1994):

1. Mampu menganalisis permasalahan atau kondisi yang tidak dapat diselesaikan secara analitis.
2. Mampu mengakurasi atau memperkuat teknik analitis dengan mempresentasikan sifat – sifat model serta kolerasinya terhadap perilaku yang sebenarnya.
3. Mampu mengevaluasi efek dari persamaan orde tinggi ke dalam analisis yang lebih sederhana dengan menghubungkan perbedaan perilaku model yang diprediksi dengan model yang sebenarnya.

Pada pemodelan fisik SPAR ini harus mendekati model fisik dari SPAR itu sendiri. Hal tersebut harus sesuai dengan persyaratan sebagai berikut:

1. Kesamaan Geometris (*Geometric Similirity*)

Kesamaan geometri adalah kesamaan perbandingan antara ukuran model dengan prototipe, harga perbandingan ini selalu bernilai konstan.

2. Kesamaan Kinematik (*Kinematic Similarity*)

Kesamaan kinematik adalah kesamaan perbandingan antara kecepatan prototipe dengan kecepatan model suatu titik.

3. Kesamaan Dinamis (*Dynamic Similarity*)

Kesamaan dinamis adalah jika dua sistem dinamis mempunyai rasio yang sama keduanya gaya – gaya yang bekerja pada elemen fluida yang ada.

Kriteria pelaksanaan terhadap model memiliki asumsi dasar yaitu penyekalaan berdasarkan atas Hukum *Froude*. Variabel-variabel penyekalaan model yang utama dikelompokkan dalam bentuk sebuah tabel yang sistematis (Tabel 2.1). Unit dari variabel-variabel tersebut terbentuk dalam sistem M-L-T (*mass-length-time*). Atas dasar Hukum Froude tersebut dengan faktor skala yang diasumsikan sebagai λ maka spesifikasi ukuran model dapat diperoleh dari prototipe yang sesungguhnya (Chakrabarti, 1994).

Tabel 2.1 Model to prototype multiple for the variables commonly used in mechanics under Froude scaling

(Chakrabarti, 1994)

VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<u>GEOMETRY</u>			
<i>Length</i>	<i>L</i>	λ	<i>Any Characteristic dimension of the object</i>
<i>Area</i>	L^2	λ^2	<i>Surface area or projected area on a plane</i>
<i>Volume</i>	L^3	λ^3	<i>For any portion of the object</i>
<i>Angle</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>e.g., between members or solid angle</i>
<i>Radius of Gyration</i>	<i>L</i>	λ	<i>Measured from a fixed point</i>
VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<i>Moment of Inertia Area</i>	L^4	λ^4	
<i>Moment of Inertia Mass</i>	ML^2	λ^5	<i>Taken about fixed point</i>
<i>Center of gravity</i>	<i>L</i>	λ	<i>Measured from a reference point</i>
<u>KINEMATICS & DYNAMICS</u>			
<i>Time</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Same reference point (e.g., starting time) is considered as zero time</i>
<i>Acceleration</i>	LT^{-2}	<i>1</i>	<i>Rate of change of velocity</i>
<i>Velocity</i>	LT^{-1}	$\lambda^{1/2}$	<i>Rate of change of displacement</i>
<i>Displacement</i>	<i>L</i>	λ	<i>Position at rest is considered as zero</i>
<i>Spring Constant (Linear)</i>	MT^{-2}	λ^2	<i>Force per unit length of extension</i>
<i>Damping Coefficient</i>	MT^{-1}	$\lambda^{5/2}$	<i>Resistance (viscous) against oscillation</i>
<i>Damping Factor</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>Ration of damping and critical damping coefficient</i>
<i>Natural Period</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Period at which inertia force = restoring force</i>

Tabel 2.2 Model to prototype multiple for the variables commonly used in mechanics under Froude scaling (Lanjutan)

(Chakrabarti, 1994)

<i>VARIABLE</i>	<i>UNIT</i>	<i>SCALE FACTOR</i>	<i>REMARKS</i>
<u><i>WAVE MECHANICS</i></u>			
<i>Wave Height</i>	<i>L</i>	λ	<i>Consecutive crest to trough distance</i>
<i>Wave Period</i>	<i>T</i>	$\sqrt{\lambda}$	<i>Time between two successive crests passing a point</i>
<i>Wave Length</i>	<i>L</i>	λ	<i>Distance between two successive crests at a given time</i>
<i>Particle Velocity</i>	LT^{-1}	$\sqrt{\lambda}$	<i>Rate of change of movement of a water particle</i>
<i>Wave Elevation</i>	<i>L</i>	λ	<i>Form of wave (distance from still waterline)</i>
<i>Particle Acceleration</i>	LT^{-2}	<i>1</i>	<i>Rate of change of velocity of a water particle</i>
<u><i>STABILITY</i></u>			
<i>Displacement (Volume)</i>	L^3	λ^3	<i>Volume of water moved by a submerged object (or part thereof)</i>
<i>Natural Period</i>	<i>T</i>	$\sqrt{\lambda}$	<i>Period of free oscillation in still water due to an initial disturbance</i>
<i>Metacenter</i>	<i>L</i>	λ	<i>Instantaneous center of rotation</i>
<i>Center of buoyancy</i>	<i>L</i>	λ	<i>Distance of C.G. of displaced volume from a fixed point</i>

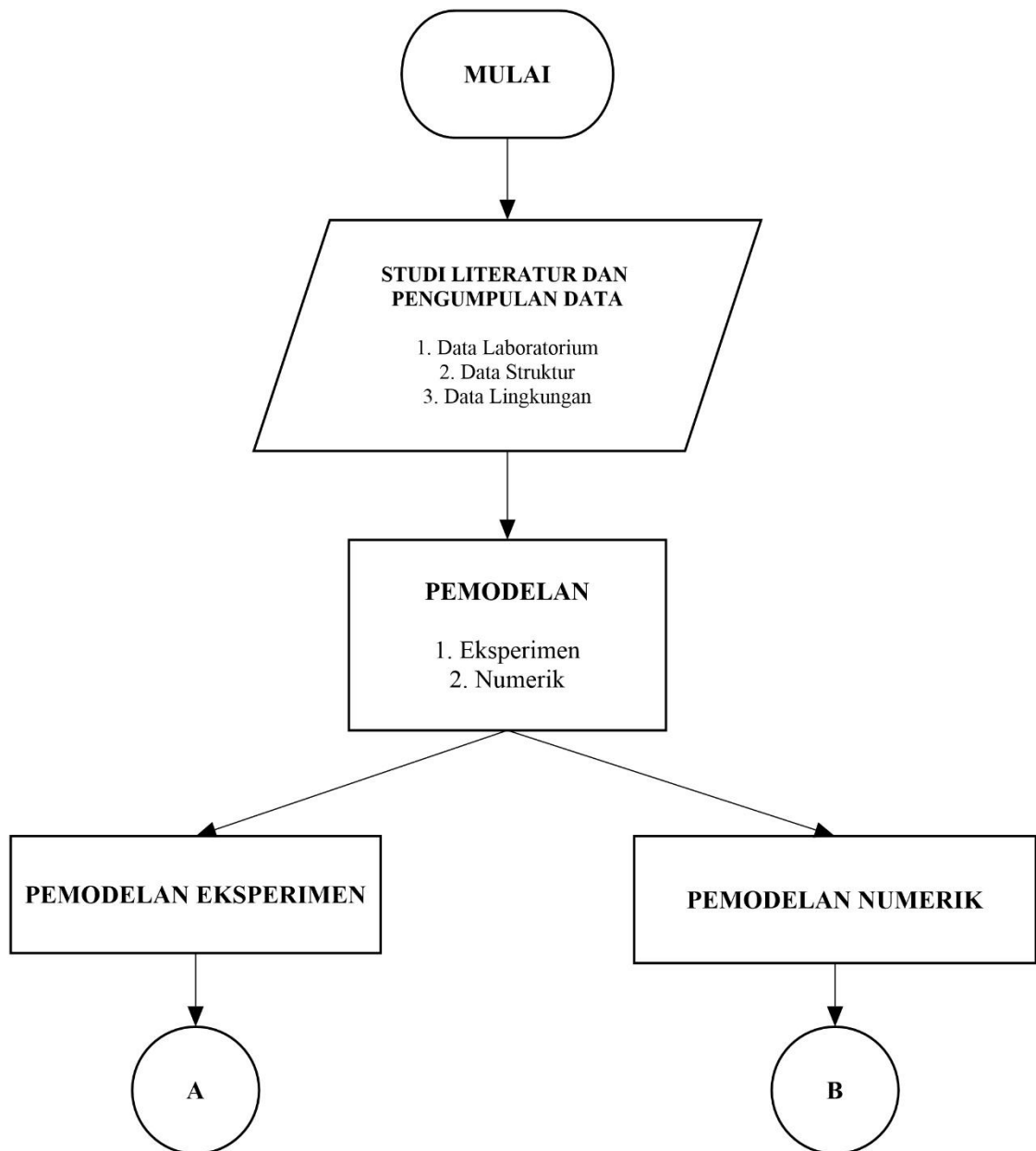
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

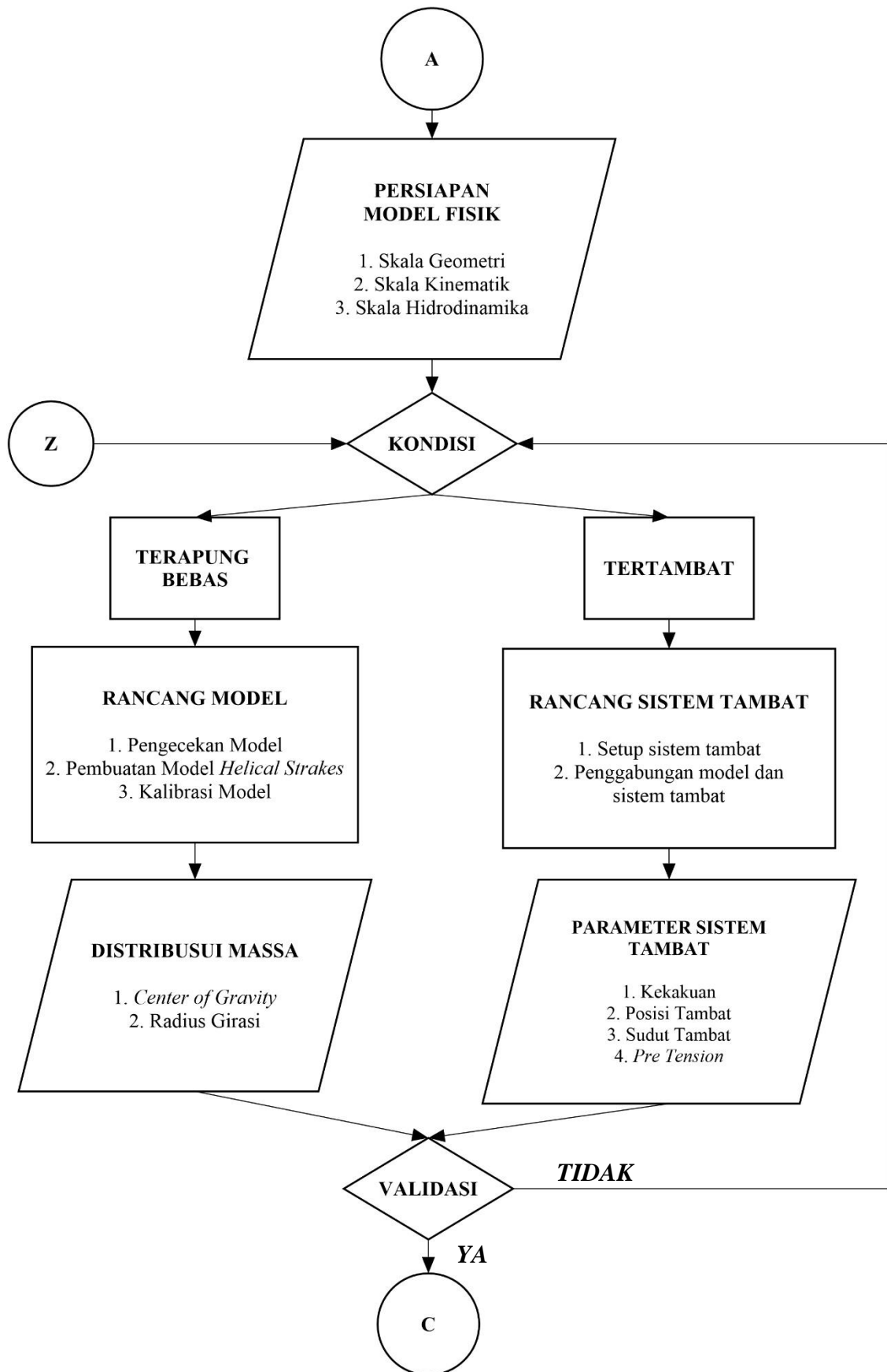
BAB III

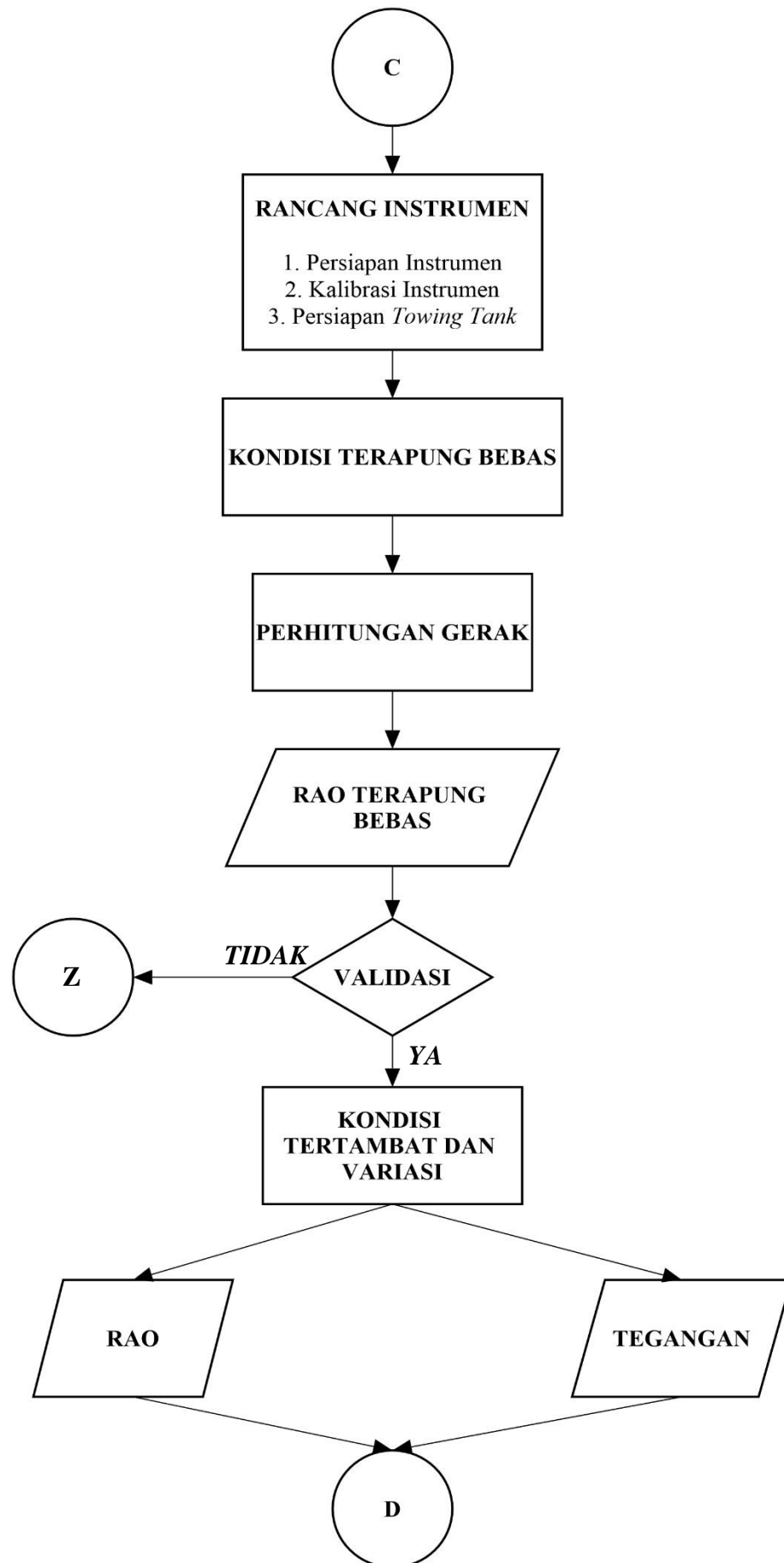
METODOLOGI PENELITIAN

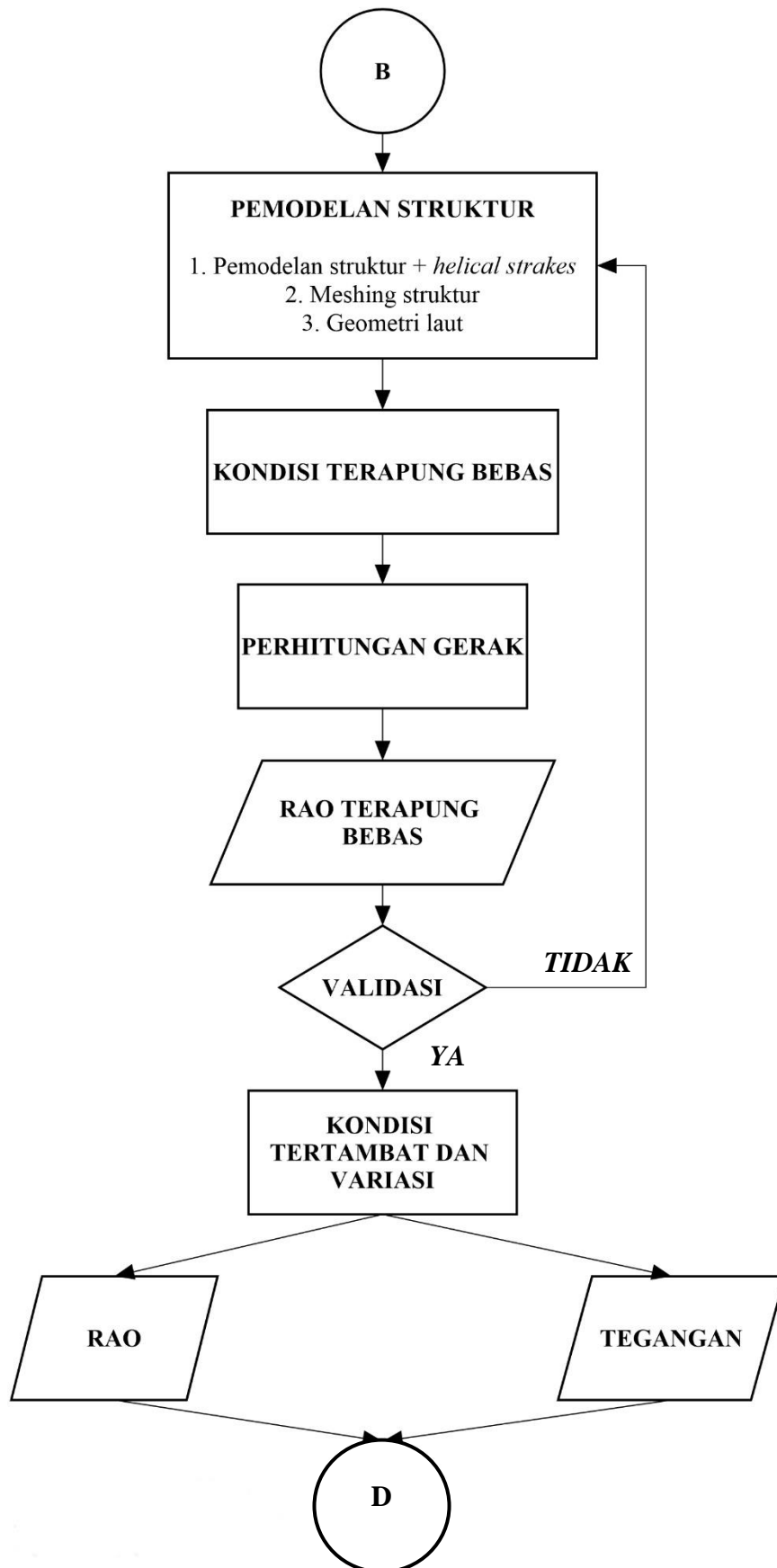
3.1. DIAGRAM ALIR

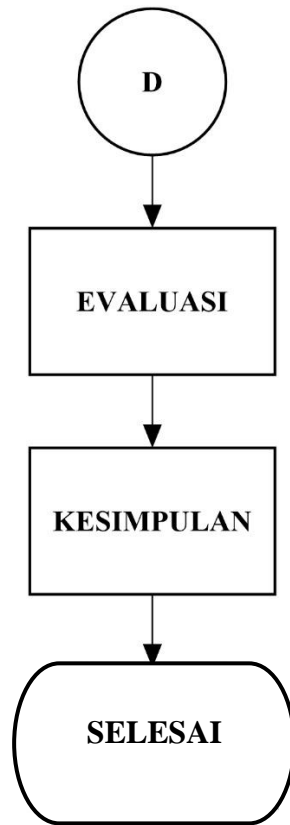
Diagram alir pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:











3.2. PENJELASAN DIAGRAM ALIR

a. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Studi Literatur dilakukan dengan mempelajari berbagai literatur yang berkaitan dengan eksperimen dan numerik, serta mengumpulkan data-data yang dibutuhkan untuk pemodelan. Pemodelan Struktur SPAR dilakukan mengacu pada model Mini Spar dari *Spar Model Test Joint Industry Project* yang dapat dilihat pada tabel 3.1. Modifikasi pada struktur menggunakan tali tambat berjumlah 4 *line* yang simetri, serta konfigurasi massa dari struktur yang menyesuaikan *center of gravity* dan radius girasi sesuai dengan data yang diperoleh. Selain itu, penggunaan data lingkungan dan panjang tali tambat menyesuaikan kemampuan dari *towing tank*. Table 3.3 menunjukkan data lingkungan dari Mini SPAR dan Tabel 3.2 menunjukkan dimensi *towing tank*. Percobaan dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS.

Tabel 3.1.a Data Mini SPAR (Deep Oil Technology Inc., 1995)

<i>Description</i>	<i>Prototype</i>	<i>Unit</i>
<u>Hull</u>		
<i>Diameter</i>	16.00	m
<i>Draft</i>	135.03	m
<i>Length</i>	154.23	m
<i>Fairlead Depth</i>	12.74	m
<u>Deck</u>		
<i>Length</i>	50.29	m
<i>Width</i>	50.29	m
<i>Height</i>	19.57	m

Tabel 3.1.b Data Mini SPAR lanjutan

<i>Description</i>	<i>Prototype</i>	<i>Unit</i>
<u>Mass Distribution</u>		
<i>Weight</i>	2653.16	Ton
<i>KG</i>	62.02	m
<i>Pitch Gyradius</i>	61.47	m
<i>Roll Gyradius</i>	61.47	m

Tabel 3.2 Data *Towing Tank* Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Panjang	50	m
Lebar	3	m
Kedalaman (penuh)	2	m
Kedalaman (operasi)	1.8	m
Temperatur	27	°C
Jendela Observasi (<i>Toughned Glass</i>)	4	buah

Tabel 3.3 Data Lingkungan

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Kedalaman	750	m

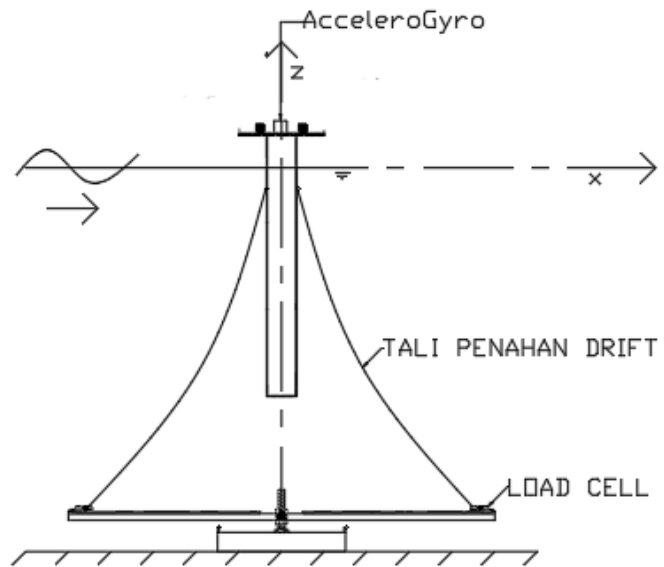
b. Pemodelan Eksperimen dan Numerik

Model Mini SPAR akan dilakukan pemodelan dalam kondisi *free floating* dan tertambat yang dianalisis secara numerik dan eksperimen. Data awal dari Mini SPAR digunakan dalam pemodelan secara numerik yang menggunakan bantuan perangkat lunak SOLIDWORKS dan ANSYS AQWA. Sedangkan untuk pemodelan secara eksperimen di Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS, diperlukan proses penyekalaan dari model yang dibuat dengan data *prototype* Mini SPAR hingga memenuhi parameter yang ditentukan.

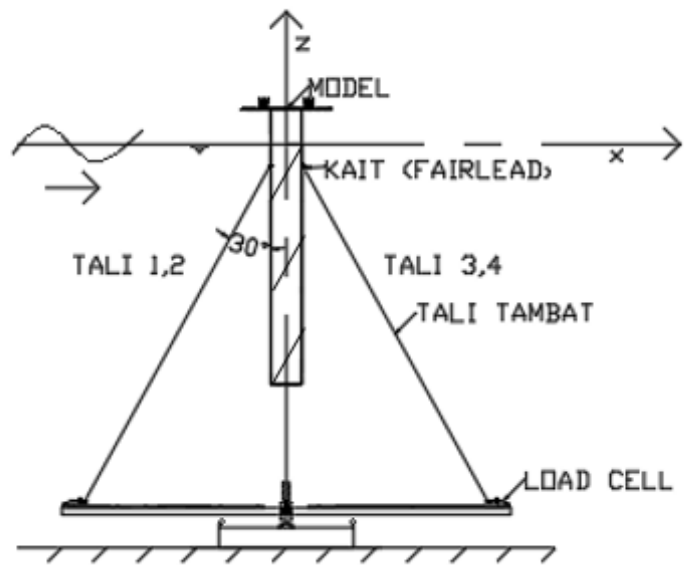
- Pemodelan Eksperimen

Langkah pertama yang dilakukan adalah pemodelan eksperimen model fisik dari Mini SPAR. Tahap ini meliputi penyekalaan model dari segi geometri prototipe, kinematik, dan hidrodinamik sistem. Penyekalaan Geometri dilakukan menyesuaikan kondisi Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS dan material model yang tersedia di pasaran. Selanjutnya, pada tahap penyekalaan hidrodinamik, menggunakan Hukum Model Froude karena hanya terbatas pada gaya inersia dan gravitasi. Kemudian, model harus mempunyai karakteristik distribusi massa yang sesuai dengan hasil skala data prototipe. Pada eksperimen ini model yang digunakan merupakan model eksperimen dari Arif dkk (2017). Setelah dilakukan pengecekan kembali pada model, selanjutnya dilakukan penambahan *Helical Strakes* pada model tersebut. Dasar dari penambahan tersebut sesuai dengan percobaan Wilson dan Tinsley (1989).

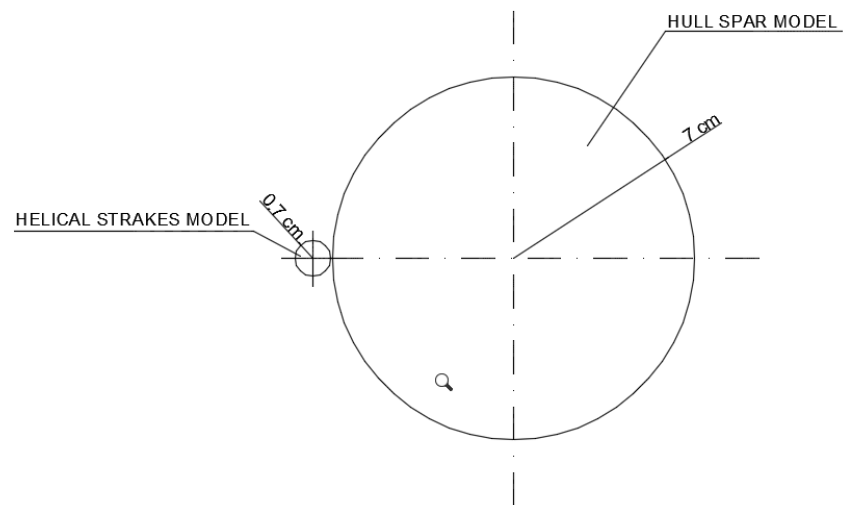
Helical Strakes dimodelkan berbentuk silinder dengan diameter 0.1 kali dari diameter *hull* SPAR. Gambar model dengan *Helical Strakes* dapat dilihat pada gambar 3.3 dan gambar 3.4. Besar sudut antara *Helical* dengan aksis silinder sebesar 60° , dengan jumlah *Strakes* adalah 1, dan *pitch ratio* dari *Helical Strakes* adalah 5 kali diameter SPAR. Model ini berdasarkan rekomendasi dari Wilson dan Tinsley (1989) mengenai dimensi dari *Helical Strakes* tersebut.



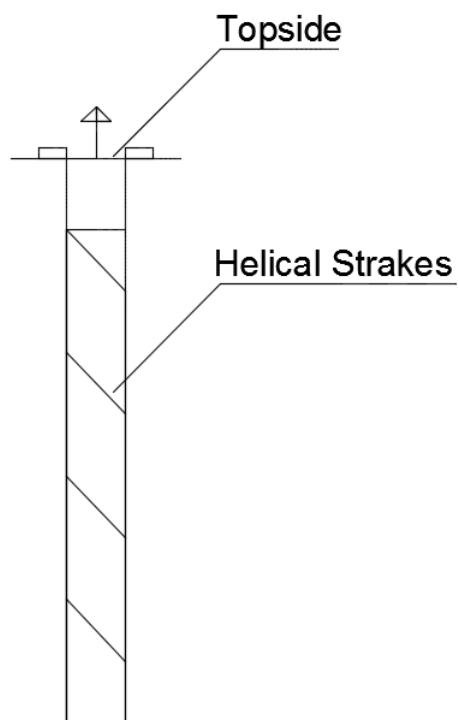
Gambar 3.1 *Setup model tanpa tali tambat (free floating)*



Gambar 3.2 *Setup model dengan tali tambat (mooring)*



Gambar 3.3 Permodelan model dengan *Helical Strakes* tampak atas



Gambar 3.4 Permodelan model dengan *Helical Strakes* tampak samping

- **Pemodelan Numerik**

Pemodelan numerik *prototype* Mini SPAR dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak SOLIDWORKS dan kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA. Pemodelan numerik dilakukan untuk menentukan parameter hidrostatik dari struktur Mini SPAR, dimana parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk mengetahui sifat-sifat struktur yang terendam. Pemodelan numerik dilakukan ketika SPAR dalam kondisi *free floating* dan menggunakan sistem tambat.

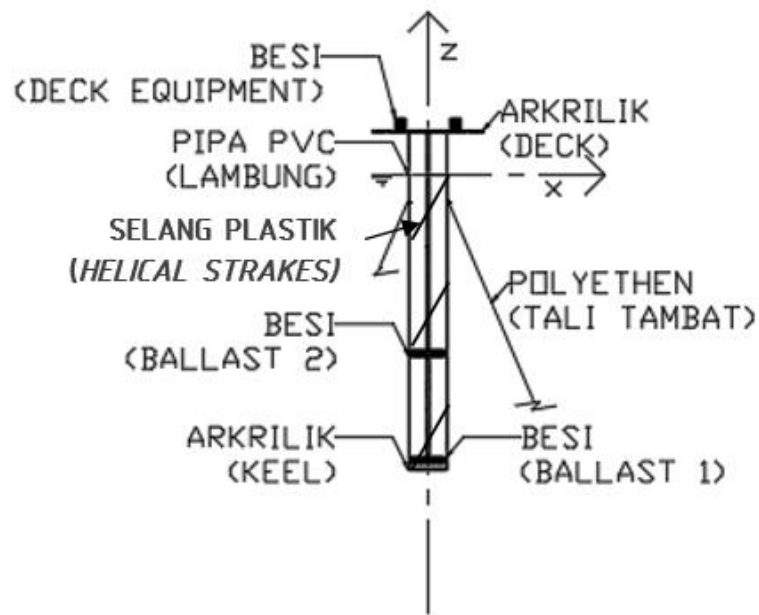
- c. **Validasi Model**

Pada tahap ini, model dilakukan validasi antara hasil pemodelan pada metode numerik dan eksperimen. Persentase perbedaan hasil pemodelan yang diisyaratkan adalah tidak lebih dari 5% terhadap data acuan. Parameter-parameter yang perlu dilakukan validasi diantaranya:

- *Displacement*
- Posisi pusat massa (*Centre of Gravity*) sumbu z (VCG)
- Jari-jari girasi sumbu x (R_x), sumbu y (R_y), dan sumbu z (R_z)

- d. **Rancang Model**

Dalam tahap ini model SPAR yang digunakan adalah model mini SPAR polos yang telah di buat oleh Arif dkk (2017). Model mini SPAR yang polos kemudian dimodifikasi dengan menambahkan *helical strakes* dengan selang yang meliliti sisi bagian luar dari mini SPAR. Dalam pembuatan model ini dikerjakan bersamaan dengan penggambaran model karena dalam penggambaran model harus sesuai dengan bahan yang ada di pasaran. Untuk hull dari SPAR menggunakan paralon dengan diameter 5 inch dan untuk struktur dasar (*keel*), serta *deck* menggunakan akrilik. Selanjutnya untuk kompartemen menggunakan besi yang berbentuk silinder pipih yang dijadikan sebagai *ballast* untuk mengatur titik berat dari model agar sesuai dengan skala yang telah ditentukan. Dalam pengaturan *ballast* digunakan sebuah silinder pejal yang berulir sehingga silinder pipih dapat diatur sesuai kebutuhan. Berikut merupakan rencana model yang akan dibuat untuk eksperimen.



Gambar 3.5 Rencana Model SPAR

e. Kalibrasi Model

Kalibrasi dilakukan untuk memenuhi parameter dimensi yang sudah disesuaikan dengan hasil pemodelan geometri. Pada awalnya *principal dimension* dari model harus disesuaikan dengan *principal dimension prototype* Mini SPAR yang menjadi acuan seperti panjang, lebar, dan *draft*. Selanjutnya, distribusi massa dari model SPAR yang meliputi titik berat dan radius girasi disesuaikan dengan data *prototype* Mini SPAR. Pada penelitian ini model dinyatakan valid jika *error* yang terjadi kurang dari 5%.

f. Rancang Sistem Tambat

Pada tahap ini, dilakukan perancangan sistem tambat yang akan digunakan pada model SPAR sebelum dilakukan eksperimen di laboratorium hidrodinamika ITS. Gambar 3.6 menunjukkan *layout* dari sistem tambat. Secara garis besar, tahap ini terdiri atas dua poin utama yaitu setup sistem tambat dan penggabungan model dengan sistem tambat. Berikut ini merupakan penjelasan untuk tiap poin utama yang dibahas.

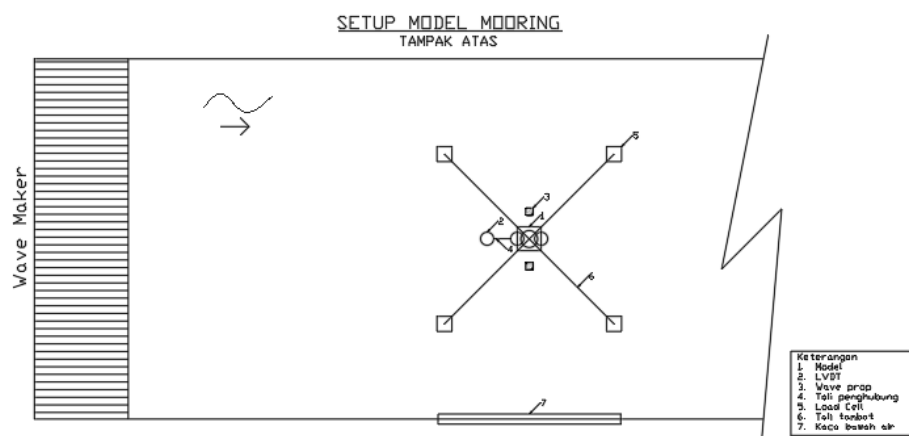
- *Setup* sistem tambat

Sistem tambat yang digunakan pada model terdiri dari empat buah mooring line yang dihubungkan dengan menggunakan *fairlead* pada *hull*

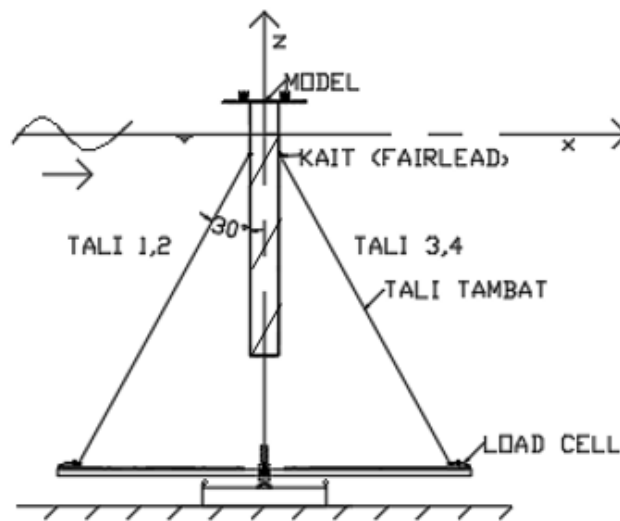
struktur dan ditambatkan pada *load cell* yang berada di jangkar pada dasar kolam Laboratorium Hidrodinamika ITS. Alat-alat yang diperlukan dalam setup sistem tambat ini antara lain :

1. *Mooring line* sebanyak 4 buah
2. *Image Processing* dan *gyroscope* untuk pengukuran gerak surge, heave, dan pitch. Gyroscope diletakkan pada topside struktur tegak lurus dengan titik berat model SPAR, sedangkan image processing menggunakan kamera yang merekam objek bola merah di atas *deck* yang digunakan sebagai acuan gerak *surge* dan *heave* model.
3. *Load Cell* sebanyak 4 buah untuk pengukuran tegangan tali
4. Jangkar di dasar untuk peletakan *load cell* serta pengaturan sudut tali
5. *Fairlead* berupa kait untuk memasang *mooring line* di model SPAR yang akan diuji sebanyak 4 buah

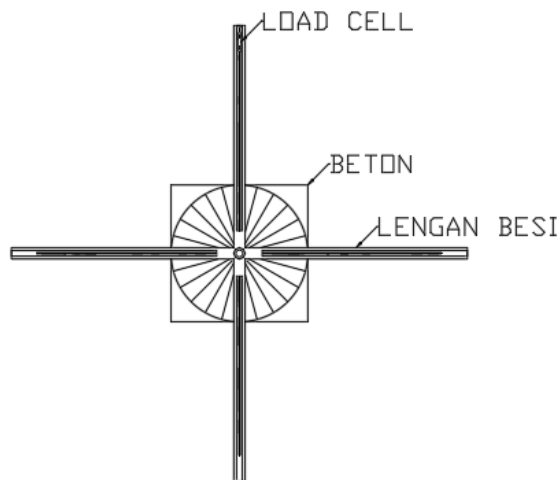
Berikut merupakan gambar tampak atas dari setup model mooring yang akan diatur di laboratorium hidrodinamika ITS.



Gambar 3.6 Tampak Atas Rencana Sistem Tambat pada Eksperimen



Gambar 3.7 Tampak Samping Rencana Sistem Tambar dan Model SPAR



Gambar 3.8 Tampak Atas Rencana Jangkar

g. Parameter Sistem Tambat

Pada tahap ini, parameter sistem tambat yang digunakan pada model SPAR akan dijelaskan secara detail. Parameter sistem tambat yang digunakan antara lain kekakuan tali tambat, posisi tambat, sudut tambat dan konfigurasi tali. Berikut ini adalah penjelasan dari tiap parameter sistem tambat yang digunakan.

- Kekakuan tali tambat

Kekakuan tali tambat dipengaruhi oleh *properties* dari material yang digunakan. Modulus elastisitas material mempengaruhi kekakuan tali tambat yang digunakan. Semakin besar kekakuannya, semakin besar pula periode natural dari struktur. Data *properties mooring line* dari *prototype* Mini SPAR hasil penelitian JIP yang menjadi acuan model SPAR yang dibuat dapat dilihat di Tabel 3.4

Tabel 3.4 *Properties* tali tambat dari *prototype* SPAR

	Model	SPAR	Satuan
Length	1.8	225	m
Diameter	0.62	115	mm
Axial Stiffness (EA)	603,814	1,175,000,000	N
MBF	222.41	11,760,000	N

- Posisi *Fairlead*

Fairlead berfungsi untuk menyambungkan *mooring line* dengan model. Pada model, *fairlead* menggunakan mata pancing yang di bor dan dipasang sesuai dengan desain.

- Sudut *Fairlead*

Sudut *fairlead* dari *mooring line* yang digunakan pada analisis model SPAR ini adalah sebesar 30 derajat. Sudut ini didapatkan ketika tali di setting dalam keadaan tegang.

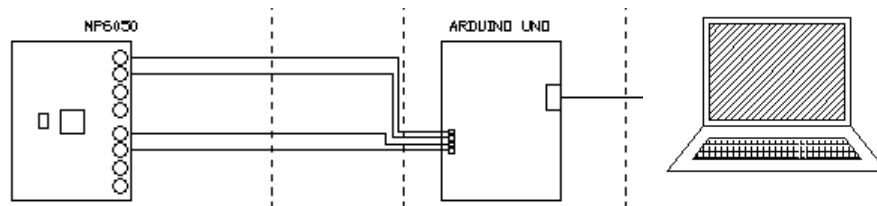
- Konfigurasi Tali

Konfigurasi tali pada awal pengujian model SPAR ini di *setting* dalam keadaan paling tegang. Panjang tali disesuaikan dengan *loadcell* di dasar kolam agar didapatkan kondisi awal tali yang tegang (*taut*). Dari autocad, didapatkan panjang tali dalam kondisi tegang adalah 1,8 m.

h. Instrumen Laboratorium

Pada tugas akhir ini, akan dilakukan eksperimen model Small SPAR yang akan diuji pada dua kondisi yaitu kondisi terapung bebas dan tertambat. Pada dua kondisi tersebut menggunakan instrument antara lain. *Gyroscope* untuk mengukur gerakan *pitch* model, *Image Processing* untuk mengukur gerakan *heave* dan *surge* model, *Load Cell* untuk mengukur tegangan tali pada sistem tambat. Ketiga alat ini mencatat data secara bersamaan ketika uji eksperimen dilakukan. Berikut merupakan penjelasan dari alat-alat pengukuran tersebut.

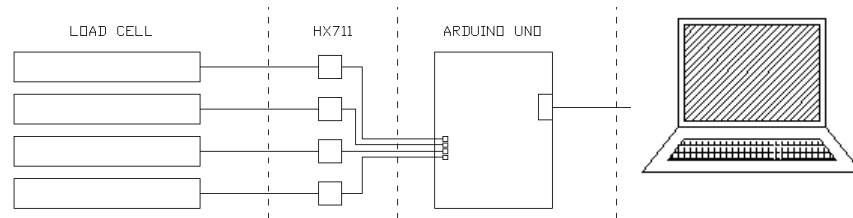
1. *Gyroscope* merupakan sensor gyro yang digunakan untuk menentukan orientasi gerak dengan prinsip ketetapan momentum sudut yang mendeteksi gerakan sesuai gravitasi. Keluaran dari *Gyroscope* berupa kecepatan sudut dari tiga sumbu yang ditinjau. Gerak rotasional sumbu y (*pitch*) dari model SPAR diukur menggunakan giroskop. Instrumen giroskop yang digunakan adalah giroskop MPU 6050 GY87, instrument yang mampu mengeluarkan sudut. Pada MPU 6050 terdapat sumbu orientasi x, y, dan z sebagai orientasi nilai yang dihasilkan oleh keluaran dari MPU 6050. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh microcontroller Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam angka angka digital. Gambar 3.9 menjelaskan tentang pengukuran gerak menggunakan *Gyroscope*.



Gambar 3.9 Diagram sistem *Accelero-gyro*

2. *Load cell* digunakan untuk mengukur tegangan tali maksimum pada sistem tambat ketika eksperimen model SPAR. Untuk mengukur tegangan tali ini, pada *Load Cell* terdapat sensor *strain gauge* yang mengukur tegangan yang diberikan oleh tali dengan cara mengubah suatu gaya tekanan menjadi besaran listrik. Perubahan tegangan tali ini akan

memberi sinyal tegangan listrik. Tegangan listrik yang dihasilkan *loadcell* akan diperbesar menggunakan *amplifier* yang kemudian akan di digitasi menggunakan *microcontroller* Arduino UNO yang kemudian akan berubah menjadi data digital di laptop.



Gambar 3.10 Diagram sistem *load cell* yang digunakan pada eksperimen

1. *Digital image processing* adalah proses pengolahan gambar dua dimensi oleh perangkat komputer. *Digital image processing* merupakan proses pengambilan atribut-atribut pada gambar dengan input dan output berupa gambar. Pada penelitian ini, *Digital image Processing* dimanfaatkan untuk pendeteksian objek pada video yang digunakan untuk menganalisa gerakan translasi naik-turun (*heave*) dan maju-mundur (*surge*). Pada struktur dipasang tiga buah bola berwarna merah diatas *deck* yang digunakan untuk menganalisa gerak pada objek. Objek yang ditinjau adalah bola merah yang berada di titik pusat model sedangkan kedua bola merah lainnya diletakkan di ujung model yang digunakan untuk perhitungan skala pixel dan validasi data yang dihasilkan. Proses *image processing* ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270. Gambar 3.11 dibawah ini merupakan kamera dan objek benda *tracking* yang digunakan dalam *image processing*.



Gambar 3.11 Kamera dan benda yang ditracking

Sedangkan Laboratorium yang digunakan untuk melakukan penelitian ini adalah Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Laboratorium Hidrodinamika tersebut mempunyai instrumen yang masih berfungsi dengan baik.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

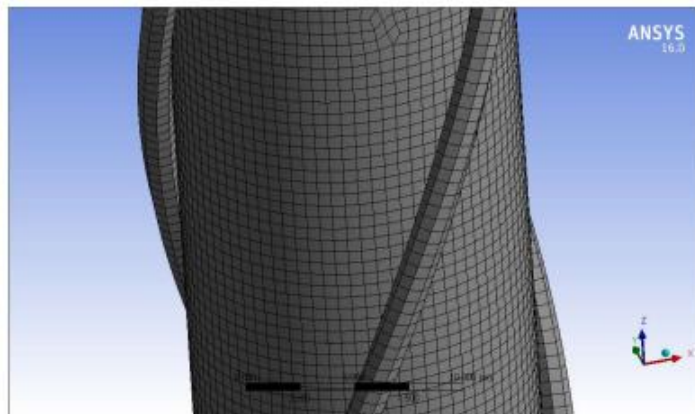
4.1. PEMODELAN STRUKTUR

4.1.1. Pemodelan Numerik

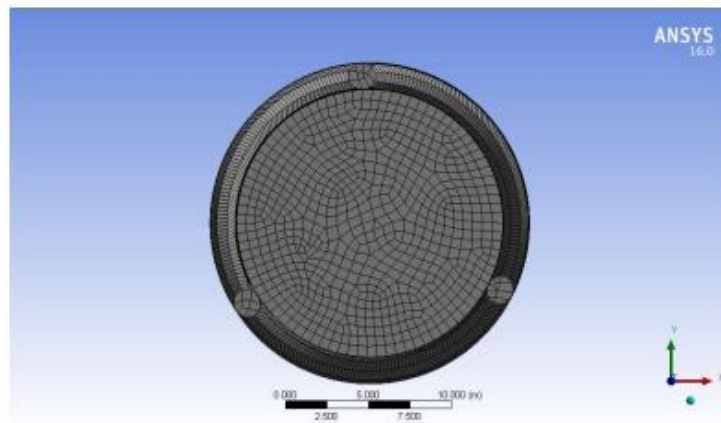
Pemodelan numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Solidwork dan ANSYS AQWA. Pemodelan numerik disesuaikan dengan dimensi dari SPAR yang diambil dari data Mini SPAR *Joint Industry Project* (1995) dengan tambahan struktur berupa *Helical Strakes*. Pada tabel 4.1 merupakan dimensi Mini SPAR *Joint Industry Project* yang digunakan dalam pemodelan numerik.

Tabel 4.1 Data Dimensi Struktur Mini SPAR (Joint Industry Project, 1995)

Deskripsi	Besaran
<u>Diameter</u>	
Diameter (m)	16.00
Draft (m)	135.03
Tinggi (m)	154.23
Kedalaman Posisi Fairlead (m)	12.74
<u>Deck</u>	
Panjang (m)	50.29
Lebar (m)	50.29



Gambar 4.1 Tampak detail model numerik dengan *meshing*



Gambar 4.2 Tampak atas model numerik dengan *meshing*



Gambar 4.3 Tampak isometris model numerik dengan *meshing*

Pemodelan numerik dengan menggunakan perangkat lunak Solidwork dan ANSYS AQWA juga memerlukan input data berupa sarat dan jari-jari girasi. Data yang dimasukkan pada ANSYS AQWA sesuai dengan tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Distribusi Massa Mini SPAR (*Joint Industry Project*, 1995)

Deskripsi	Besaran
Massa Total (ton)	26531.52
Keel to Gravity (m)	62.02
Radius Girasi YY (m)	61.47
Radius Girasi XX (m)	61.47

4.1.2. Pemodelan Eksperimen

Dalam melakukan studi eksperimen, SPAR dimodelkan menggunakan skala 1:125. Proses penskalaan yang dilakukan mengikuti aturan Froude yang hasilnya sesuai dengan tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil Penskalaan Model SPAR

Deskripsi	Prototype	Faktor skala	Model
Massa (kg)	26531524.910	λ^3	13.584
Diameter (m)	16.000	λ	0.128
Sarat (m)	135.010	λ	1.080
Panjang (m)	154.210	λ	1.234
Keel to Gravity (m)	62.022	λ	0.496
Radius Girasi YY (m)	61.470	λ	0.492
Radius Girasi XX (m)	61.470	λ	0.492
Periode gelombang (s)	40, 29, 23.5, 19, 14.5, 12.3, 5.5	$\lambda^{1/2}$	3.6, 2.6, 2.1, 1.7, 1.3, 1.1, 0.5

Pipa yang digunakan sebagai lambung yaitu pipa PVC 5” karena menyesuaikan dengan ukuran dari diameter dari model. Pipa di ukur dan dipotong sesuai dengan hasil penskalaan. Untuk bagian bawah pipa PVC ditutup menggunakan akrilik yang ditempelkan menggunakan lem lalu didempul agar tidak bocor. Setelah dimensi utama dari model fisik terpenuhi,

distribusi massa dari model fisik juga dimodelkan. Distribusi massa dari SPAR terdapat pada Tabel 4.3. Penambahan *Helical Strakes* dilakukan pada lambung luar pipa PVC dengan bahan selang. Di dalam lambung model fisik diberi besi ulir dan silinder untuk mengatur distribusi beban dari model fisik dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Tampak depan model fisik



Gambar 4.5 Pemberat dan ulir di dalam lambung model fisik

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan distribusi massa yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung massa total

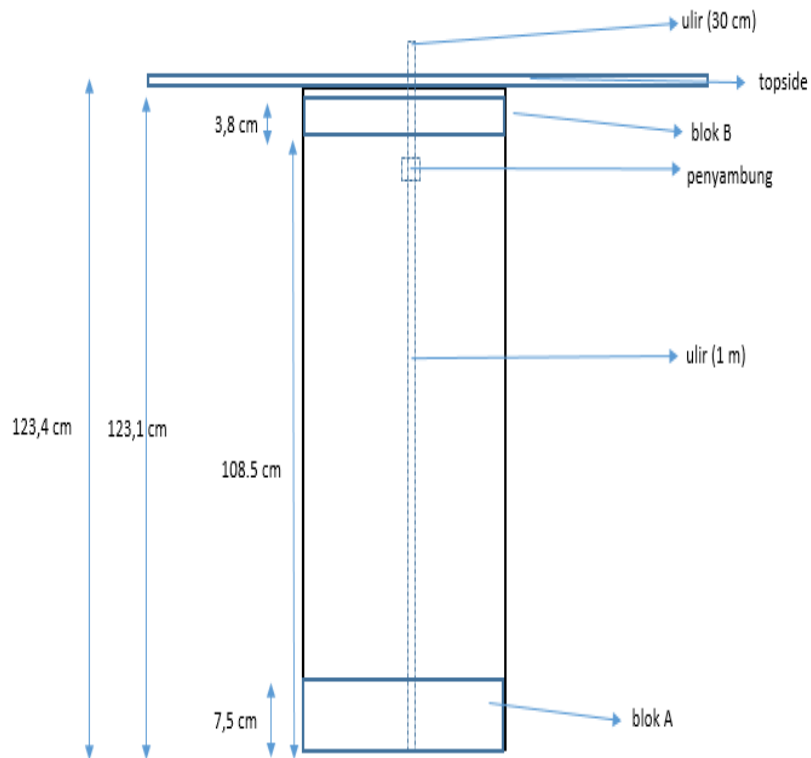
Setiap material model yang digunakan ditimbang untuk mendapatkan massa total struktur. Proses menimbang material dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Kelautan, hasil penimbangan yang didapat ditampilkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Penimbangan Berat Material

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.49	1	1628.49
	Ballast 2	2	1623.09	1	1623.09
	Ballast 3	2.5	2094.09	1	2094.09
	Ballast 4	1	663.59	1	663.59
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
Blok B	Ballast 1	2.5	2096.69	1	2096.69
	Ballast 2	0.8	465.99	1	465.99
	Ballast 3	0.5	179.49	1	179.49
Topside		0.3	599.50	1	599.50
Tambahan	Ulir (130 cm)		352.09	1	352.09
	Pipa	-	4087.53	1	4087.53
	Penyambung	-		1	0.00
	<i>Helical Strakes</i>		96.64	3	289.91
	Mur	-		2	0.00
Total					14127.93

2. Distribusi beban untuk pemenuhan jari-jari girasi

Setiap material yang digunakan dihitung momen inersia massanya. Kemudian dari masing-masing momen inersia material digabungkan untuk dicari momen inersia massa total. Momen inersia massa total yang didapatkan digunakan untuk menghitung jari-jari girasi model fisik.



Gambar 4.6 Desain Pemberat dan Ulir

Perhitungan dari setiap blok sebagai berikut:

a. Pipa PVC (Silinder Berongga)

Persamaan 4.1 merupakan persamaan momen inersia massa dari silinder berongga relatif terhadap pusat massanya dengan I_{ox} merupakan momen inersia massa gerakan roll, I_{oy} merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, r merupakan radius silinder dan l merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (6r^2 + l^2) \quad (4.1)$$

Tabel 4.5 Perhitungan Momen Inersia massa PVC

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
PVC	4087.53	5287070.00	5287070.00

b. Blok A (Lingkaran Pejal)

Blok A terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal. Persamaan 4.2 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari silinder pejal relatif terhadap pusat massanya dengan I_{ox} merupakan momen inersia massa gerakan *roll*, I_{oy} merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, r merupakan radius silinder dan l merupakan panjang silinder.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (3r^2 + l^2) \quad (4.2)$$

Blok A terdiri dari pemberat berbahan besi dan *cap* berbahan akrilik. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok A terlampir di Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Perhitungan momen inersia massa Blok A

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Ballast 1</i>	1628.49	16446.05	16446.05
<i>Ballast 2</i>	1623.09	16391.52	16391.52
<i>Ballast 3</i>	2094.09	20624.60	20624.60
<i>Ballast 4</i>	663.59	6825.99	6825.99
<i>Cap</i>	47.46	471.32	471.32

c. Blok B (Lingkaran Pejal)

Blok B terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal, sehingga persamaan yang digunakan sama dengan perhitungan blok A (Persamaan 4.2). Blok B hanya terdiri dari pemberat berbahan besi. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok B terlampir di Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Perhitungan momen inersia massa Blok B

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Ballast 5</i>	2096.7	20748.49	20748.49
<i>Ballast 6</i>	465.99	4556.90	4556.90
<i>Ballast 7</i>	179.49	1756.57	1756.57

d. Topside

Topside terdiri dari geladak berbahan akrilik. Bentuk dari geladak merupakan balok dengan panjang 40 cm, lebar 40 cm dan tebal 0.3 cm. Persamaan 4.3 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari topside relatif terhadap pusat massanya dengan I_{ox} merupakan momen inersia massa gerakan *roll*, I_{oy} merupakan momen inersia massa gerakan *pitch*, m merupakan masa benda, p merupakan panjang balok, l merupakan lebar balok dan t merupakan tebal balok.

$$I_{ox} = \frac{1}{12} m (l^2 + t^2) \quad (4.3a)$$

$$I_{oy} = \frac{1}{12} m (p^2 + t^2) \quad (4.3b)$$

Tabel 4.8 merupakan hasil perhitungan momen inersia massa *topside*.

Tabel 4.8 Perhitungan momen inersia *topside*

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Geladak	599.5	79937.8	79937.8

e. Ulir

Pemberat blok A dan blok B dimasukkan ke dalam ulir. Ulir merupakan baut yang berbentuk silinder pejal sehingga untuk menghitung momen inersia massanya dapat menggunakan persamaan 4.2. Hasil perhitungan momen inersia dari ulir ditampilkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.9 Perhitungan momen inersia massa ulir

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Ulir	352.09	495873.99	495873.99

f. *Helical Strakes*

Helical Strakes terbuat dari selang plastik yang dililitkan pada lambug luar model SPAR dengan satu kali lilitan sebanyak 3 buah *strakes* yang digunakan dalam pemodelan. *Helical Strakes* dalam pemodelan ini berbentuk slinder pejal. Sehingga momen inersia dari *Helical Strakes* adalah

Tabel 4.10 Perhitungan momen inersia massa *Helical Strakes*

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Helical Strakes</i>	352.09	101469.24	101469.24

Setelah momen inersia massa dari setiap material diketahui, perhitungan momen inersia massa total terhadap pusat masa dilakukan. Langkah pertama untuk mencari momen inersia total tersebut adalah dengan mencari pusat masa dari benda terlebih dahulu. Tabel 4.11 merupakan hasil perhitungan pusat masa model.

Tabel 4.11 Posisi pusat massa dari setiap material yang dipakai

		Berat (g)	LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
Blok A	<i>Cap</i>	47.46	0.00	0.00	0.15
	Ballast 1	1628.5	0.00	0.00	6.50
	Ballast 2	1623.1	0.00	0.00	4.50
	Ballast 3	2094.1	0.00	0.00	3.0
	Ballast 4	663.59	0.00	0.00	1.25
Blok B	Ballast 5	2096.7	0.00	0.00	109.75
	Ballast 6	465.99	0.00	0.00	111.40
	Ballast 7	179.49	0.00	0.00	112.05
Tambahan	Topside	599.50	0.00	0.00	123.55
	Ulir (130 cm)	352.09	0.00	0.00	65.30
	<i>Helical 1</i>	96.64	7.75	0	54
	<i>Helical 2</i>	96.64	4.25	6.81	54
	<i>Helical 3</i>	96.64	4.25	6.81	54
PVC	PVC	4087.5	0.00	0.00	61.70
	Total	14127.93			

Tabel 4.12 Pusat massa model

LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
0.00	0.00	49.11

Setelah pusat massa dari model diketahui, momen inersia massa relatif terhadap pusat masa dapat dicari. Jari-jari girasi dapat dicari dengan

momen inersia masa yang diketahui, sesuai dengan persamaan 4.4. Tabel 4.13 menampilkan hasil jari-jari girasi dari model.

$$Jari - jari\ girasi = \sqrt{\frac{Inersia\ massa\ total\ gerak\ yang\ ditinjau}{massa\ total\ model}} \quad (4.4)$$

Tabel 4.13 Jari-jari girasi model

<i>Rxx (cm)</i>	<i>Ryy(cm)</i>
48.21	48.21

Validasi pada model yang sudah jadi ditampilkan pada Tabel 4.14 di bawah ini merupakan perbandingan dari distribusi massa hasil skala dengan nilai target hasil perhitungan.

Tabel 4.14 Perbandingan distribusi massa hasil skala dengan nilai target hasil perhitungan

Deskripsi	Model Fisik		Hasil Perhitungan		Error (%)
	Besaran	Satuan	Besaran	Satuan	
Massa Total	13.58	kg	14.127	kg	4.03 %
<i>Keel to Gravity (KG)</i>	49.6	cm	49.11	cm	1%
Jari-jari girasi gerak <i>pitch</i>	49.2	cm	48.21	cm	1.97%
Jari-jari girasi gerak <i>roll</i>	49.2	cm	48.21	cm	1.97%

4.2. PEMODELAN TALI TAMBAT

Tali tambat yang digunakan dalam studi eksperimen ini mengacu pada tali tambat pada katalog dari Balmoral Marine (2010) yang berisi properties *mooring equipment* seperti jangkar, rantai, *wire rope* dan lain-lain yang digunakan dalam industri lepas pantai. Pada studi eksperimen ini, data tali tambat yang dijadikan acuan adalah tali *wire rope* dengan data kekakuan.

Dari data di Gambar 4.7, properties *wire rope* yang digunakan adalah *wire rope* dengan kekakuan sebesar 1175 MN. Properties dari *wire rope* yang digunakan dijelaskan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Properti *mooring line*

Diameter	115	mm
Masa jenis (udara)	65	kg/m
Masa jenis (air)	55	kg/m
MBF	11760	kN
Kekakuan	1175	MN

WIRE ROPE

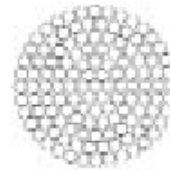
4

ROPE SPECIFICATIONS

SPIRAL STRAND

4.34

- Designed to improve service life
- Surface finish: hot dip galvanised
- Sheathing: HDPE yellow colour with longitudinal dark stripe
- Tensile grades of wire optimised to improve wire ductility
- Rope, size, mass and MBF may be customised according to project design requirements
- Supply includes: Quality plan - Fatigue design calculations
Wear design calculation - Corrosion design calculation



Wire rope dia		Mass (unsheathed)		Mass (sheathed)		Metallic Area mm ²	MBF kN	Stiffness MN	Torque 25% MBF Nm	Turns 25% MBF
Uncoated mm	Sheathed mm	Air kg/m	Sea water kg/m	Air kg/m	Sea water kg/m					
77	91	29	25	32	25	3440	5480	525	750	0.5
83	99	34	29	37	29	4000	6370	610	950	0.5
89	105	39	33	42	33	4600	7330	700	1200	0.4
96	114	46	38	49	38	5350	8530	820	1500	0.4
102	122	51	43	55	43	6040	9360	925	1750	0.4
108	128	58	49	61	48	6770	10490	1035	2100	0.4
115	137	65	55	69	54	7680	11760	1175	2500	0.3
121	145	72	61	76	60	8500	12720	1300	2850	0.3
127	151	80	67	84	66	9370	13930	1435	3300	0.3
134	160	89	75	93	73	10430	15510	1595	3850	0.3
140	168	97	82	101	79	11390	16930	1740	4400	0.3
147	175	107	90	112	88	12550	18660	1920	5100	0.3

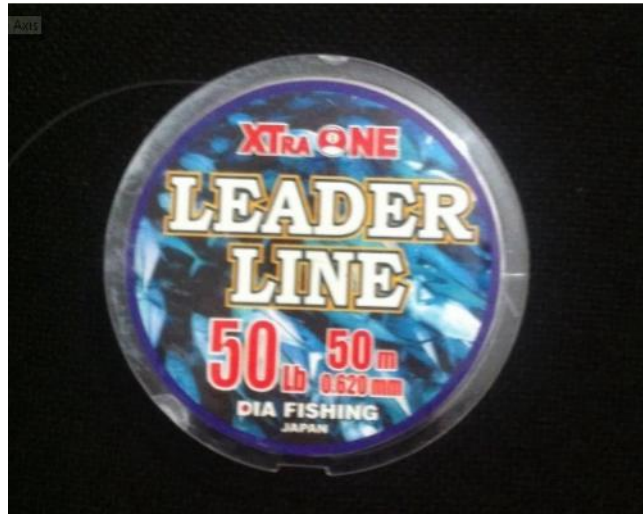
All dimensions are approximate

Gambar 4.7 Katalog property *wire rope*

Tali tambat yang sudah ditentukan kemudian diskala menjadi dimensi eksperimen. Bahan yang digunakan di sini adalah senar pancing, dapat dilihat pada Gambar 4.9, yang menggunakan bahan nilon, dengan properties yang dijelaskan pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16 Spesifikasi tali tambat eksperimen

Keterangan	Simbol	Model (tali pancing)	Satuan
Modulus elastisitas	E	2000000000	N/m ²
Diameter tali	D	0.62	mm
Luas Tali	A	0.3019	mm ²
Panjang Tali	L	1.8	m



Gambar 4.8 Bahan tali tambat

Kemudian, penskalaan dilakukan kembali pada senar pancing sesuai dengan skala model untuk mendapatkan spesifikasi tali tambat yang digunakan pada model fisik. Skala model yang digunakan adalah 1:125, maka dari hasil skala didapatkan properties tali tambat model fisik dijelaskan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.17 Spesifikasi tali tambat model fisik

Keterangan	Simbol	Model (tali pancing)	Satuan
Modulus elastisitas	E	250000000000	N/m ²
Diameter tali	D	77.50	mm
Luas Tali	A	4717.30	mm ²
Panjang Tali	L	225	m

Dari Tabel 4.17 di atas, kekakuan tali dapat dihitung dengan Persamaan 4.5.

$$K = E \times A$$

$$K = 250,000 \text{ MN/m}^2 \times 0.00472 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

$$K = 1,179.32 \text{ MN}$$

Validasi dilakukan dengan membandingkan kekakuan *wire rope* yang ada pada katalog Balmoral Marine (2010) dengan senar. Perbandingan keduanya terlampir pada Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Perbandingan kekakuan *prototype* dengan data kekakuan *wire rope* acuan

<i>Stiffness</i> model asli (MN)	<i>Stiffness wire rope</i> acuan (MN)	Error (%)
1179,32	1175	0,37

Dari perbandingan kekakuan pada Tabel 4.18, didapatkan persentase error yang terjadi sebesar 0,368 % memenuhi syarat dari validasi (<5%). Sehingga untuk analisis eksperimen dan numerik data properties tali tambat ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Data property tali tambat yang digunakan pada model fisik

	Model fisik	Prototype	Satuan
Length	1.8	225	m
Diameter	0.62	115	mm
Axial Stiffness (EA)	603.814	1,175,000,000	N
MBF	222.41	11,760,000	N

4.3. VALIDASI MODEL

4.3.1. Validasi Model Numerik

Model yang dibuat di Ansys AQWA dapat dilihat parameter hidrostatisnya dan distribusi massanya. Parameter ini yang akan digunakan untuk memvalidasi model fisik, sehingga bisa dilakukan analisis. Pada penelitian ini batas maksimum error yang diijinkan adalah 5 %. Tabel 4.20 menampilkan perbandingan antara model numerik dan data. Berdasar Tabel 4.20 maka model numerik yang dibuat di Ansys AQWA bisa dilanjutkan untuk analisis gerak dan tali tambat.

Tabel 4.20 Perbandingan dan validasi model numerik dengan data

	Prototype		Model Numerik		Error (%)
Diameter	16.00	m	16.00	m	0.00
Draft	135.03	m	131.78	m	2.40
Length	154.23	m	154.23	m	0.00
Fairlead depth	12.74	m	12.74	m	0.00
Weight	26531524.91	kg	26837614.91	kg	1.154
KG	62.02	m	62.03	m	0.00
Roll Gyration	61.47	m	59.26	m	3.61
Pitch Gyration	61.47	m	59.26	m	3.61
Mooring Diameter			115	mm	
Mooring Stiffness (EA)			1175	MN	

4.3.2. Validasi Model Eksperimen

Setelah melakukan proses perencanaan, model fisik yang sudah dibuat dilakukan validasi. Validasi diperlukan karena pada pembuatan, selain material utama yang dipakai, pada model juga terdapat material pendukung seperti lem, dempul, resin dan sebagainya. Proses ini dilakukan sebagai berikut:

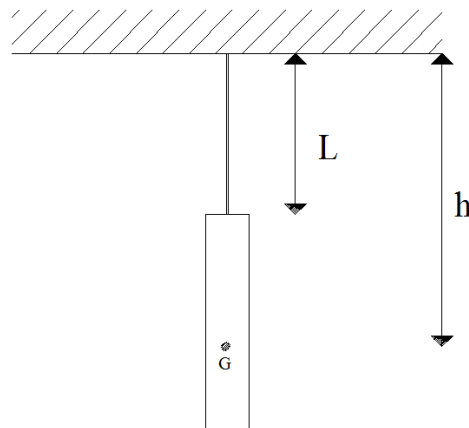
1. Massa Total

Perhitungan massa total dilakukan dengan melihat sarat yang dimiliki struktur ketika keadaan terapung. Berdasar pengamatan yang didapat sarat model fisik didapatkan 105.4 cm. Dengan sarat dan diameter lambung yang diketahui, maka berat model dapat dihitung sebagai perkalian antara volume tercelup dan massa jenis air, sehingga didapat displacement model sebesar 13,56 kg.

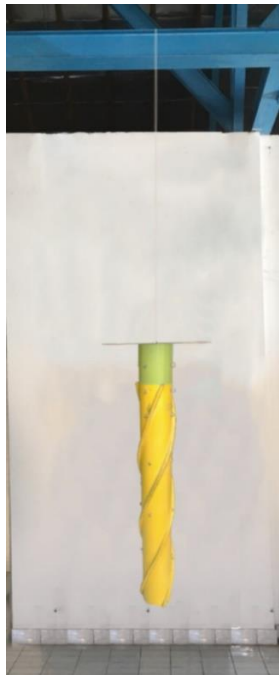
2. Jarak KG dan Jari-jari Girasi

Jarak KG dan jari-jari girasi pada struktur dihitung dengan melakukan tes pendulum pada struktur. Tes pendulum merupakan tes mengayunkan model dan menghitung periode dari ayunan struktur. Tes dilakukan dengan dua kondisi, kondisi 1 merupakan kondisi model tanpa massa tambahan, sedangkan kondisi 2 merupakan kondisi model dan pemberat

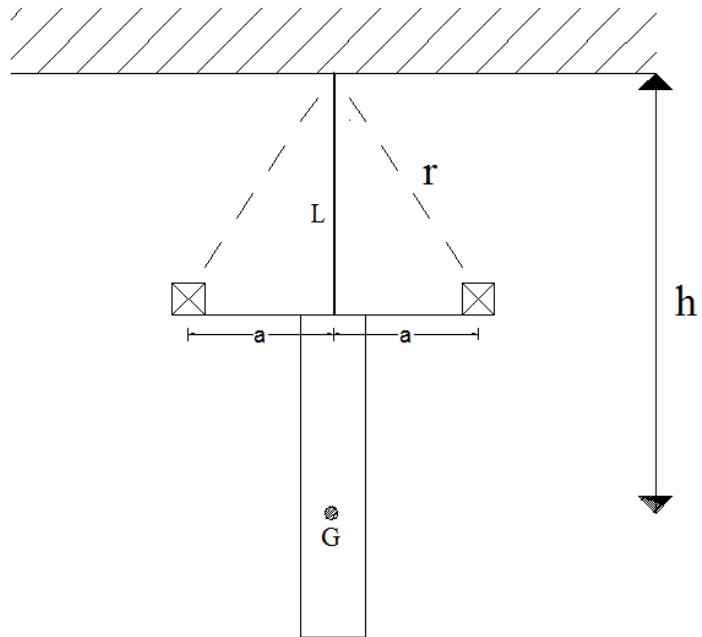
pada jarak tertentu. Pemberat yang dipakai merupakan plastisin yang telah dihitung beratnya di Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Kelautan. Pada setiap kondisi dicatat periode ayunannya. Periode yang didapat kemudian digunakan untuk mencari KG dan jari-jari girasi. Skenario tes pendulum untuk kondisi 1 dan kondisi 2 dapat dilihat pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.11. Ukuran-ukuran yang dipakai untuk tes pendulum terdapat pada Tabel 4.21 berikut ini.



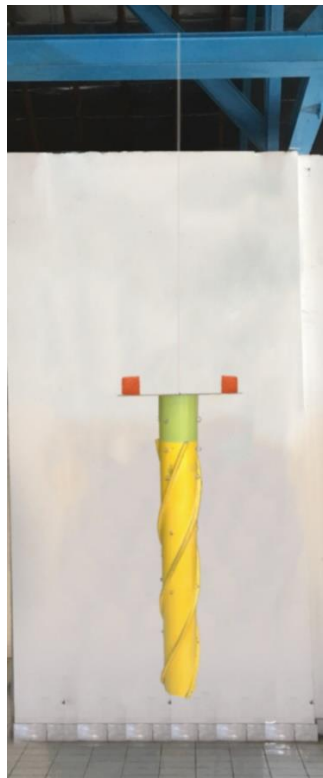
Gambar 4.9 Skenario tes pendulum kondisi 1 perhitungan jari-jari girasi



Gambar 4.10 Tes pendulum kondisi 1



Gambar 4.11 Skenario tes pendulum kondisi 2 untuk perhitungan jari-jari girasi



Gambar 4.12 Tes pendulum kondisi 2

Tabel 4.21 Ukuran-ukuran yang digunakan pada pendulum test

1.	Berat Model (m)	14	kg
2.	Percepatan gravitasi (g)	9.81	m/s ²
3.	Jarak massa tambah (a)	0.1525	m (dari titik pusat model)
4.	Berat massa tambah (m _a)	1.552	kg
5.	Panjang tali (L)	2.178	m
6.	Panjang tali terhadap jarak massa tambah (r)	2.1836	M

Tes pendulum dilakukan sebanyak 50 kali. Hasil pengukuran dari periode gerak pendulum model fisik pada kondisi 1 dan kondisi 2 disajikan dalam LAMPIRAN. Rata-rata periode yang didapat ditampilkan dalam Tabel 4.22.

Tabel 4.22 Periode dan frekuensi gerak pendulum model fisik kondisi 1 dan 2

1.	Periode gerak tanpa massa tambah (T ₀)	3.4752	detik
2.	Periode gerak dengan masa tambah (T ₁)	3.434	detik
3.	Frekuensi tanpa massa tambah (ω ₀)	1.81298	rad/s
4.	Frekuensi dengan massa tambah (ω ₁)	1.82991	rad/s

Dari data-data pada Tabel 4.22 dapat ditentukan jarak dari titik tumpuan tali ke titik berat model (h) dengan menggunakan persamaan 4.6.

$$h = \frac{2m(r^2\omega_1^2 - Lg)}{\left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0}\right)^2\right]Mg} \quad (4.6)$$

$$h = 2.90023 \text{ m}$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat diketahui titik berat model adalah sebagai berikut :

$$KG = \text{panjang total (dari ujung tali sampai keel)} - h$$

$$KG = 341.2 - 290.023$$

$$KG = 51.17 \text{ cm dari keel}$$

Dari hasil perhitungan di atas, dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model fisik terhadap titik gantung dengan persamaan 4.7.

$$I_{44} = I_{55} = \frac{mgh}{\omega_o^2} \quad (4.7)$$

$$I_{44} = I_{55} = \mathbf{142.1579 \text{ kg.m}^2}$$

Kemudian dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model relatif terhadap titik berat dengan Persamaan 4.8.

$$I_m = I - mh^2 \quad (4.8)$$

$$I_m = \mathbf{4.0127 \text{ kgm}^2}$$

Nilai momen inersia yang diketahui dapat digunakan untuk mencari jari-jari girasi sesuai dengan Persamaan 4.9.

$$Radius \text{ girasi} = \sqrt{\frac{I_m}{m}} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{Radius \text{ girasi} = 0.49461 \text{ m}}$$

Karena massa terdistribusi merata relatif terhadap sumbu z, maka radius girasi *pitch* dan *roll* adalah identik dengan nilai 49.461 cm.

Tabel 4.23 Validasi data prototype dan data model

Validasi	Data Prototype	Data Model	error (%)
Titik Berat dari keel (cm)	49.6177	51.17685	3.179137
Radius girasi pitch (cm)	49.1764	49.46104	0.53056
Radius girasi roll (cm)	49.1764	49.46104	0.53056

Tabel 4.23 menunjukkan perbandingan parameter model antara *prototype*, target dan model fisik. Model fisik valid apabila error yang terukur kurang dari 5%.

Tabel 4.24 Validasi model fisik

	Data		Konversi	Target		Achieved		Error
Diameter	16.00	m	125	12.80	cm	12.80	cm	0.0 %
<i>Draft</i>	135.03	m	125	108.00	cm	105.4	cm	2.407 %
Length	154.23	m	125	123.4	cm	123.40	cm	0.0 %
<i>Fairlead Depth</i>	12.74	m	125	10.2	cm	10.20	cm	0.0 %
Weight	26531524.91	kg	1953125	13.58	kg	14	kg	4.03 %
KG	62.03	m	125	49.6	cm	51.17685	cm	3.179137 %
Roll Gyrase	61.48	m	125	49.2	cm	49.46104	cm	0.53056 %
<i>Pitch</i> Girasi	61.48	m	125	49.2	cm	49.46104	cm	0.53056 %
<i>Mooring Diameter</i>						0.62	mm	
EA (Stiffness)						1175	MN	-

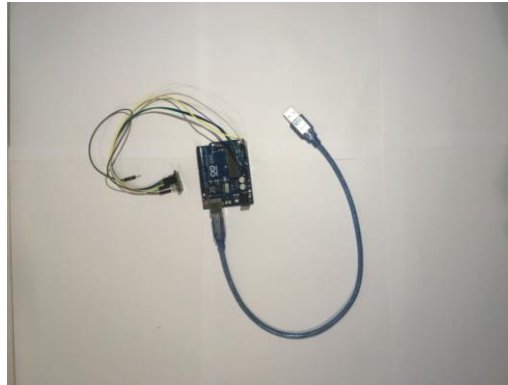
4.4. INSTRUMEN PENGUKURAN

Pada studi eksperimen diperlukan suatu instrumentasi yang digunakan untuk mengukur gerak dan tegangan tali dari model fisik. Pengukuran gerak model fisik menggunakan *gyroscope* dan *image processing*, sedangkan pengukuran tegangan tali menggunakan instrumen *loadcell*. Sebelum dilakukan pengukuran pada percobaan/ eksperimen, ketiga instrumen ini harus dilakukan kalibrasi.

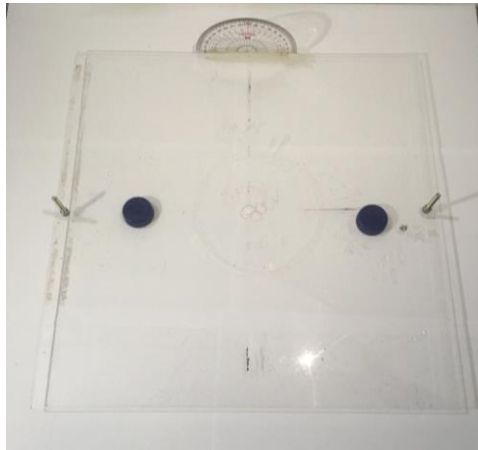
4.4.1. Kalibrasi Gyroscope

Gerak rotasional sumbu y (*pitch*) dari model SPAR diukur menggunakan *gyroscope*. Instrumen *gyroscope* yang digunakan adalah *gyroscope* MPU 6050 GY87. Instrumen ini mampu mengukur sudut yang dibentuk oleh MPU 6050. Pada MPU 6050 terdapat sumbu orientasi x, y dan z sebagai orientasi nilai yang dihasilkan keluaran dari MPU 6050. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam angka-angka digital.

Instrumen *gyroscope* (Gambar 4.13) diletakkan pada bagian geladak (Gambar 4.14) pada model fisik yang berbentuk persegi dengan bahan akrilik.

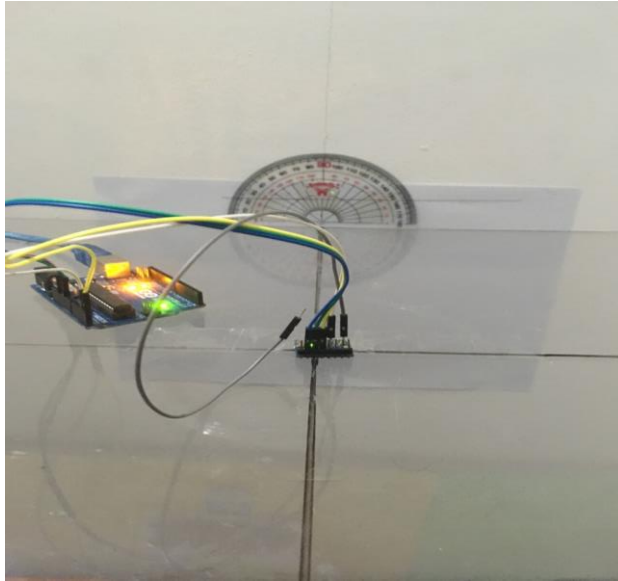


Gambar 4.13 Instrumen *gyroscope*

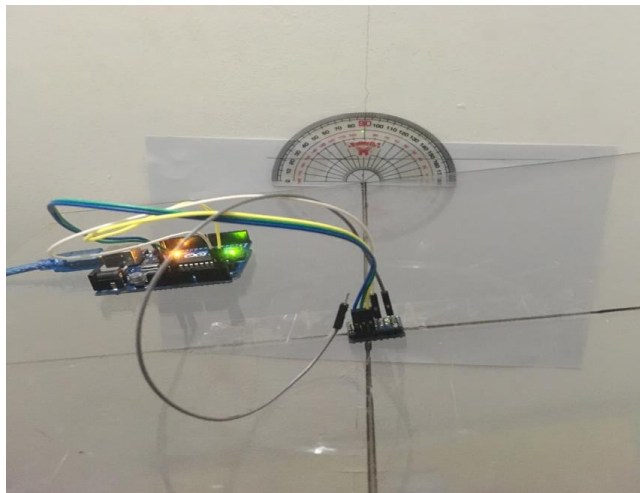


Gambar 4.14 Geladak dan busur

Kalibrasi *gyroscope* dilakukan untuk menyesuaikan nilai keluaran dari sensor dengan nilai sudut yang terjadi (Gambar 4.15). Kalibrasi dilakukan dengan mengukur sudut 0° , 10° , 30° , 40° , 50° , dan 60° di atas meja dengan bantuan busur (Gambar 4.16). Proses ini dilakukan dengan dua arah pengukuran yaitu searah dan berlawanan jarum jam relatif terhadap *gyroscope*.



Gambar 4.15 *Gyroscope* pada geladak model fisik



Gambar 4.16 *Gyroscope* dan geladak saat proses kalibrasi

```

COM19 (Arduino/Genuino Uno)

-----
Angle of inclination in X axis = 358.74°
-----
Angle of inclination in X axis = 359.36°
-----
Angle of inclination in X axis = 359.82°
-----
Angle of inclination in X axis = 359.34°
-----
Angle of inclination in X axis = 359.27°
-----
Angle of inclination in X axis = 359.18°
-----
Angle of inclination in X axis = 0.29°
-----
Angle of inclination in X axis = 359.59°
-----
Angle of inclination in X axis = 0.17°
-----

```

Gambar 4.17 *Ouput* Arduino pada arah sudut 0° derajat

Gambar 4.17 merupakan tampilan output di komputer. Tabel 4.25 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* saat *gyroscope* diputar searah jarum jam. Tabel 4.26 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran *gyroscope* diputar berlawanan arah jarum jam.

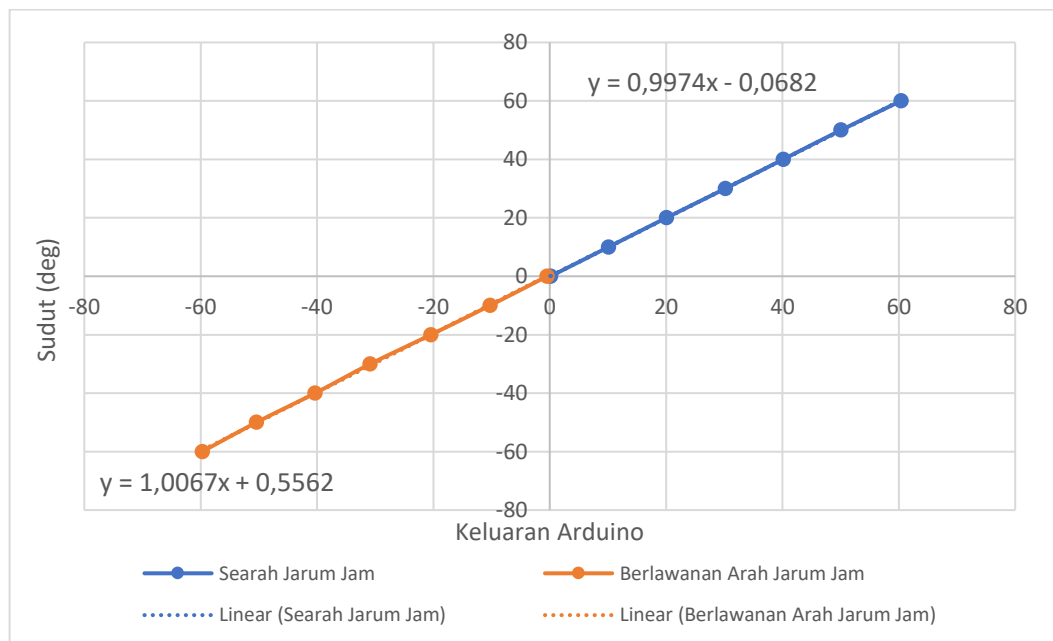
Tabel 4.25 Kalibrasi searah jarum jam

Sudut (deg)	Keluaran Gyroscope (satuan)
0°	0.20
10°	10.11
20°	20.05
30°	30.17
40°	40.13
50°	50.06
60°	60.38

Tabel 4.26 Kalibrasi berlawanan jarum jam

Sudut (deg)	Output Giro (satuan)
-0°	-0.45
-10°	-10.26
-20°	-20.42
-30°	-30.85
-40°	-40.33
-50°	-50.42
-60°	-59.73

Tabel 4.25 dan Tabel 4.26 dapat dibuat grafik seperti Gambar 4.18. Berdasarkan hasil kalibrasi *gyroscope* yang dilakukan, keluaran yang dihasilkan oleh Arduino mempunyai persamaan sesuai Tabel 4.27. Hal ini menunjukkan keluaran yang dikeluarkan merupakan sudut yang dibentuk dengan nilai positif menunjukkan berlawanan jarum jam dan negatif searah jarum jam. Kalibrasi dilakukan antara sudut 0° hingga 60° searah dan berlawanan arah jarum jam karena gerakan SPAR diasumsikan tidak akan bergerak *pitch* lebih dari 60°. Selain itu, validasi dilakukan dengan interval sudut sebesar 10° sehingga dapat diketahui apakah sensor dapat membaca mendekati hasil sebenarnya. Keluaran yang dihasilkan memiliki hubungan secara linier yang dapat disimpulkan bahwa sensor terkalibrasi untuk digunakan pada studi eksperimen kali ini.



Gambar 4.18 Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk

Tabel 4.27 Persamaan *trendline* Arduino

Searah Jarum Jam	$y = 0.997x - 0.068$
Berlawanan Arah Jarum Jam	$y = 1.006x + 0.556$

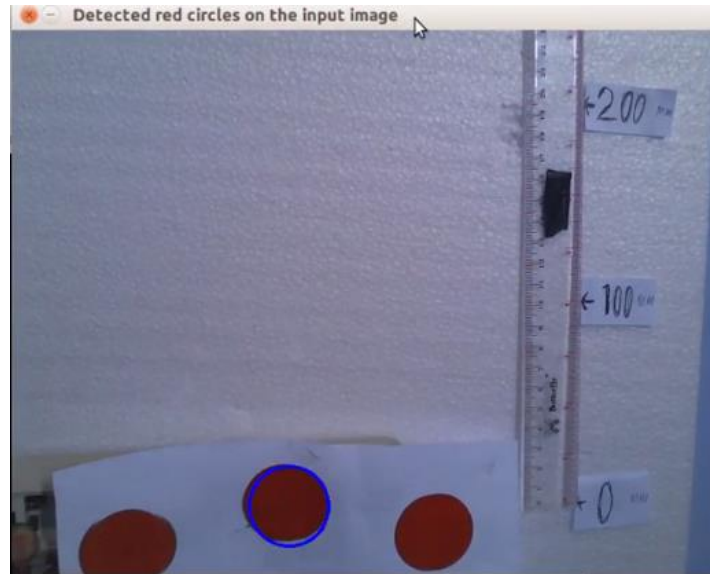
4.4.2. Kalibrasi Image Processing

Digital image processing merupakan proses pengambilan atribut-atribut pada gambar yang telah di ambil dengan suatu kamera. Pada penelitian kali ini *digital image processing* dimanfaatkan untuk pendeteksian objek pada video yang digunakan untuk merekam gerakan translasi naik-turun (*heave*) dan maju-mundur (*surge*) yang terjadi pada objek berupa model SPAR yang mengapung di dalam air dan terkena gelombang dengan variasi periode gelombang.

Dalam proses representasi dan pemodelan, kuantitas dan karakter dari *pixel* menggambarkan suatu objek. *Pixel* merupakan satuan titik kecil yang menyusun sebuah gambar. Setiap *pixel* pada gambar menyimpan informasi warna. Banyaknya *pixel* yang menyusun suatu gambar tergantung pada resolusi gambar, ketika gambar memiliki nilai *pixel* yang besar berarti gambar tersebut memiliki resolusi yang tinggi pula.

Pada penelitian ini, dipasang tiga buah bola berwarna merah pada model fisik yang terapung di air yang digunakan untuk merekam gerak pada objek. Warna merah dipilih untuk mendapatkan kontras warna pada gambar yang direkam. Selain itu bentuk lingkaran juga lebih mudah dibedakan oleh program. Objek yang ditinjau adalah bola berwarna merah yang berada di titik pusat model sedangkan bola yang diletakkan di ujung model digunakan untuk perhitungan skala *pixel* dan validasi data yang dihasilkan. Proses *image processing* ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270 yang merekam gambar kemudian diolah menggunakan bantuan perangkat lunak visual basic C++.

Proses kalibrasi *image processing* dilakukan dengan cara merekam kertas yang diberi gambar lingkaran berwarna merah seperti gambar 4.19. Pada proses kalibrasi kertas tersebut di gerakkan keatas dan kekanan sesuai dengan ukuran penggaris yang telah di siapkan dalam proses kalibrasi. Kemudian dilihat pada keluaran computer yang telah menangkap perpindahan dari objek lingkaran berwarna merah yang ditinjau seperti gambar 4.20.



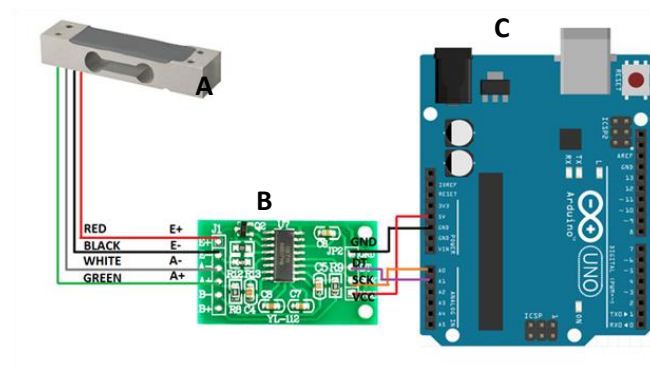
Gambar 4.19 Proses kalibrasi *image processing*

=	0	mm		y = 0	mm	
=	3	mm		y = 2	mm	
=	0	mm		y = 0	mm	
=	3	mm		y = 2	mm	
=	1	mm		y = 2	mm	
=	0	mm		y = 0	mm	
=	0	mm		y = 0	mm	
=	2	mm		y = 1	mm	
=	2	mm		y = 1	mm	
=	0	mm		y = 0	mm	
=	1	mm		y = 0	mm	
=	1	mm		y = 1	mm	
=	0	mm		y = 0	mm	
=	4	mm		y = 1	mm	
=	1	mm		y = 1	mm	
=	0	mm		y = 0	mm	
=	1	mm		y = 1	mm	
=	1	mm		y = 1	mm	
=	3	mm		y = 2	mm	
=	0	mm		y = 0	mm	
=	2	mm		y = 2	mm	
=	0	mm		y = 0	mm	
=	1	mm		y = 1	mm	
=	1	mm		y = 1	mm	
=	3	mm		y = 3	mm	
=	1	mm		y = 1	mm	
=	0	mm		y = 0	mm	
=	0	mm		y = 0	mm	

Gambar 4.20 Keluaran dari proses kalibrasi *image processing*

4.4.3. Kalibrasi *Load Cell*

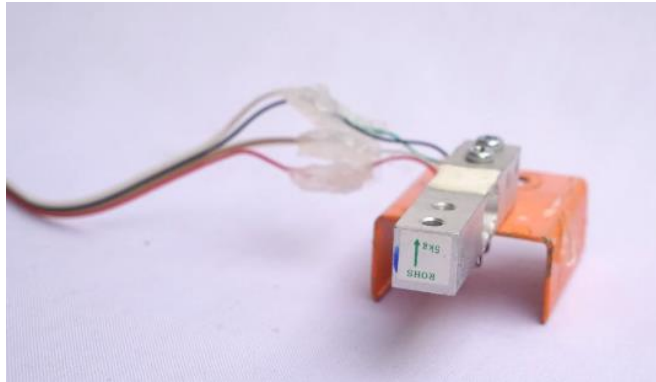
Tegangan tali diukur menggunakan instrumen *load cell*. Instrumen ini memanfaatkan *strain-gauge* yang terpasang pada *load cell*. Jika *load cell* mengalami tarikan maka *strain-gauge* akan mengalami perubahan bentuk. Perubahan bentuk ini akan menghasilkan perubahan tegangan listrik. Tegangan listrik ini kemudian diamplifikasi menggunakan modul elektronik HX711 agar dapat terbaca. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop dalam bentuk angka-angka digital.



Gambar 4.21 Konfigurasi *load cell* (A), HX711 (B), dan Arduino UNO (C)
(Layad Circuit, 2010)

Pada studi eksperimen, 4 *load cell* digunakan untuk mengukur tegangan tali dari 4 tali tambat, sehingga diperlukan 4 HX711 (*amplifier*) dan 4 *channel* dari 1 Arduino UNO. Arduino merupakan *platform open source* sehingga program dapat diunduh dengan mudah. Untuk pembacaan *load cell* digunakan program milik Jeff Rowberg (2012) dengan modifikasi minor untuk *data logging* ke excel.

Instrumen *load cell* yang digunakan pada studi eksperimen ini adalah *load cell* dengan kapasitas beban maksimum 1 kg. *Load cell* akan berfungsi jika beban mempunyai arah sesuai arah kerja *load cell* (Gambar 4.22).



Gambar 4.22 Instrumen *load cell* dan arah beban

Angka digital yang ditampilkan oleh laptop perlu dikalibrasi sehingga dapat diketahui nilai yang sesungguhnya. Kalibrasi dilakukan dengan menimbang beberapa beban terukur sehingga dapat dicari regresi linear dari nilai-nilai yang keluar. Pada kalibrasi ini digunakan 5 buah beban, 1000 gram, 500 gram, 200 gram, 100 gram dan 50 gram (Gambar 4.31). Beban yang digunakan untuk pengukuran merupakan besi timbangan yang ada dipasaran. Besi timbangan juga sudah diukur ulang di Laboratorium Mekanika Tanah menggunakan timbangan elektronik dan menunjukkan nilai ± 1 gram. Besi timbangan ditali dan digantungkan di sisi pengukuran *load cell*. Pada layar akan terlihat keluaran angka. Kemudian, setelah diberikan beban, angka yang muncul tersebut diolah untuk dicari regresi linear kalibrasi *load cell*. Setiap *load cell* akan diuji 2 kali untuk menemukan persamaan regresi linear dari setiap *load cell*.



Gambar 4.23 Beban kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D), dan 50 g (E)

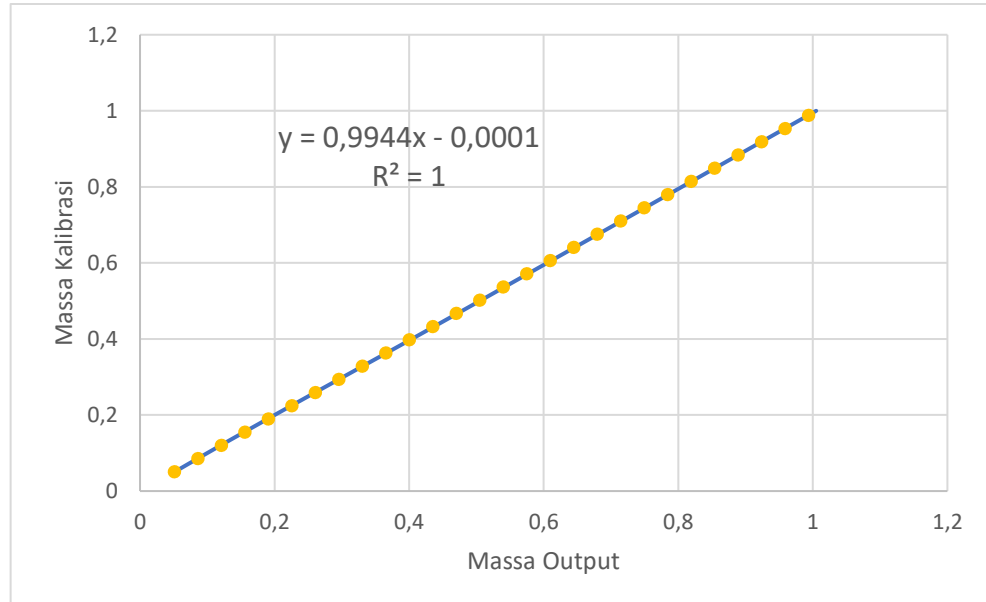
Data yang ditunjukkan dari proses kalibrasi dengan 5 timbangan pada setiap *load cell* dengan 2 percobaan yang berbeda.

- *Load cell 1*

Data pada Tabel 4.28 kemudian di-*plot* menjadi Gambar 4.24. Gambar 4.24 menunjukkan *Load cell 1* mempunyai persamaan linier. sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.28 Data Kalibrasi load cell 1

Beban (kg)	Output Percobaan
1	1.005
0,5	0.505
0,2	0.2
0,1	0.1
0,05	0.051
0	0



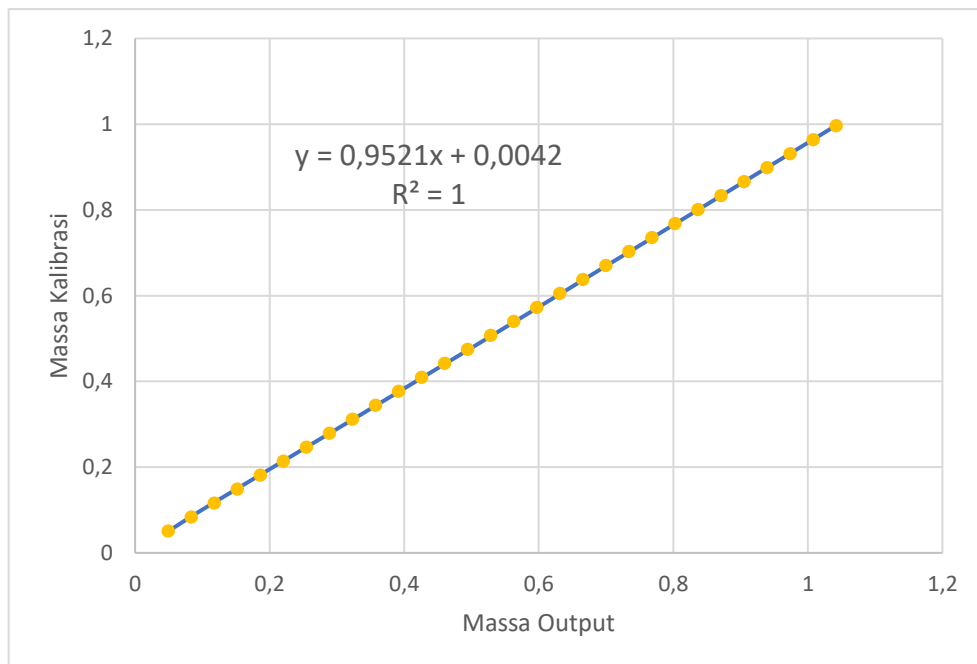
Gambar 4.24 Grafik kalibrasi *load cell 1*

- *Load cell 2*

Data pada Tabel 4.29 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.25. Gambar 4.25 menunjukkan *Load cell 2* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.29 Data kalibrasi *load cell 2*

Beban (kg)	Output Percobaan
1	1.045
0.5	0.523
0.2	0.205
0.1	0.099
0.05	0.049
0	0



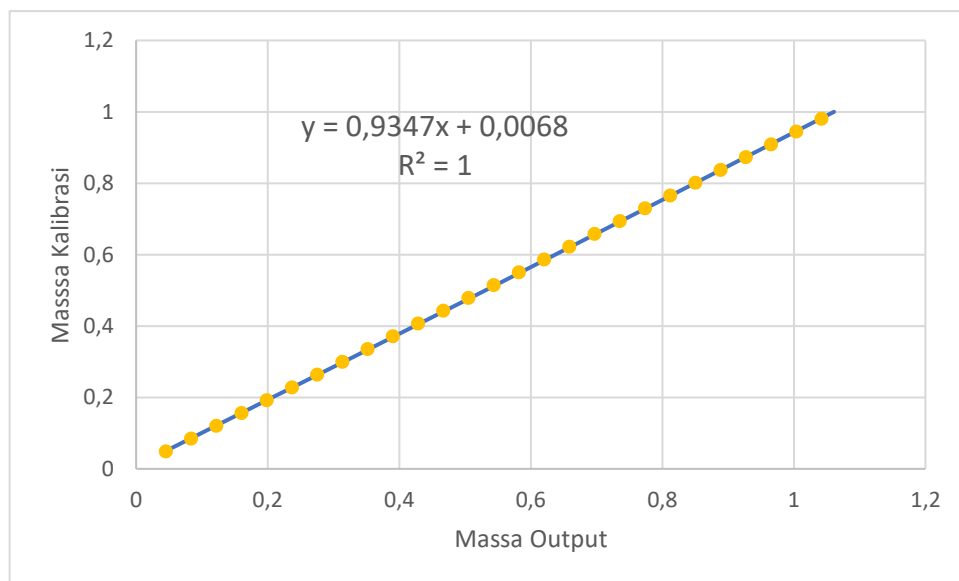
Gambar 4.25 Grafik kalibrasi *load cell 2*

- *Load cell 3*

Data pada Tabel 4.30 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.26. Gambar 4.26 menunjukkan *Load cell 3* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.30 Data kalibrasi *load cell 3*

Beban (kg)	Output Percobaan
1	1.061
0.5	0.531
0.2	0.207
0.1	0.099
0.05	0.05
0	0



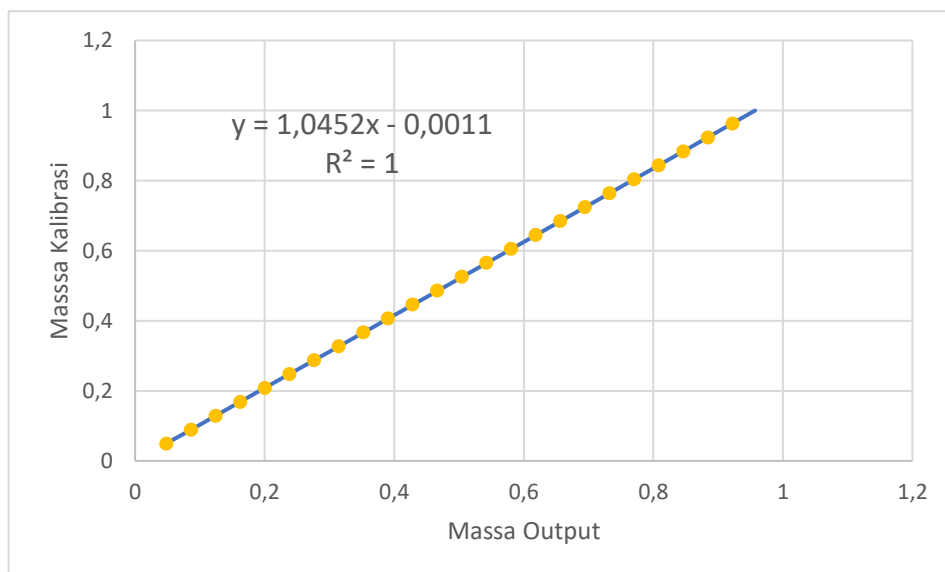
Gambar 4.26 Grafik kalibrasi *load cell 3*

- *Load cell 4*

Data pada Tabel 4.31 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.27. Gambar 4.27 menunjukkan *Load cell 4* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.31 Data kalibrasi *load cell 4*

Beban (kg)	Output Percobaan
1	0.957
0.5	0.481
0.2	0.192
0.1	0.097
0.05	0.048
0	0



Gambar 4.27 Grafik kalibrasi *load cell 4*

Persamaan yang digunakan untuk mengkalibrasi keluaran *load cell* ditampilkan dalam Tabel 4.32

Tabel 4.32 Persamaan kalibrasi keluaran *load cell* dengan beban

<i>LOAD CELL 1</i>	$y = 0.9944x - 0.0001$
<i>LOAD CELL 2</i>	$y = 0.9521x - 0.0042$
<i>LOAD CELL 3</i>	$y = 0.9347x - 0.0068$
<i>LOAD CELL 4</i>	$y = 1.0452x - 0.0011$

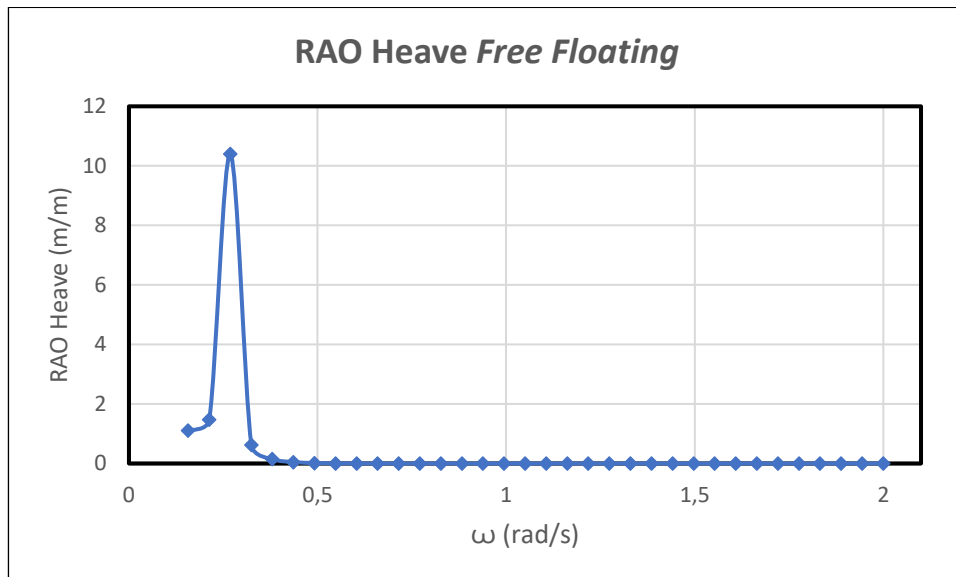
4.5. RAO *FREE FLOATING*

4.5.1. Metode Numerik

Analisa numerik dari respon gerak bangunan apung pada kondisi terapung bebas (*free floating*) dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA. Parameter yang dimasukkan dalam perangkat lunak adalah massa struktur SPAR, *Center of Gravity*, dan Radius Girasi. Pada penampilan RAO terapung bebas dibawah akan diplot grafik RAO model SPAR dengan *Helical Strakes*.

a. Mode Gerakan Heave

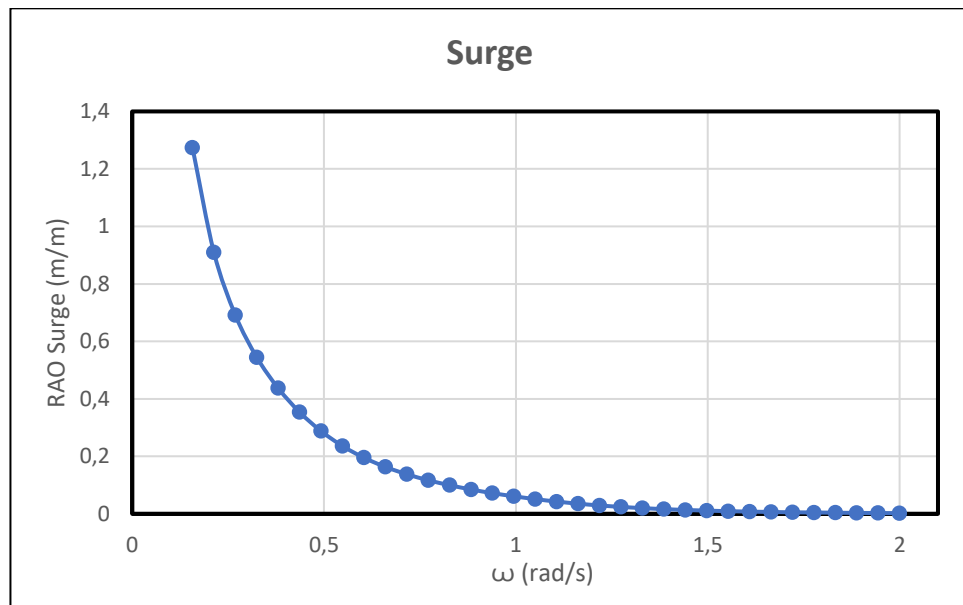
RAO pada mode gerak heave dari SPAR ditampilkan pada gambar 4.28



Gambar 4.28 RAO *free floating* gerakan heave

b. Mode Gerakan Surge

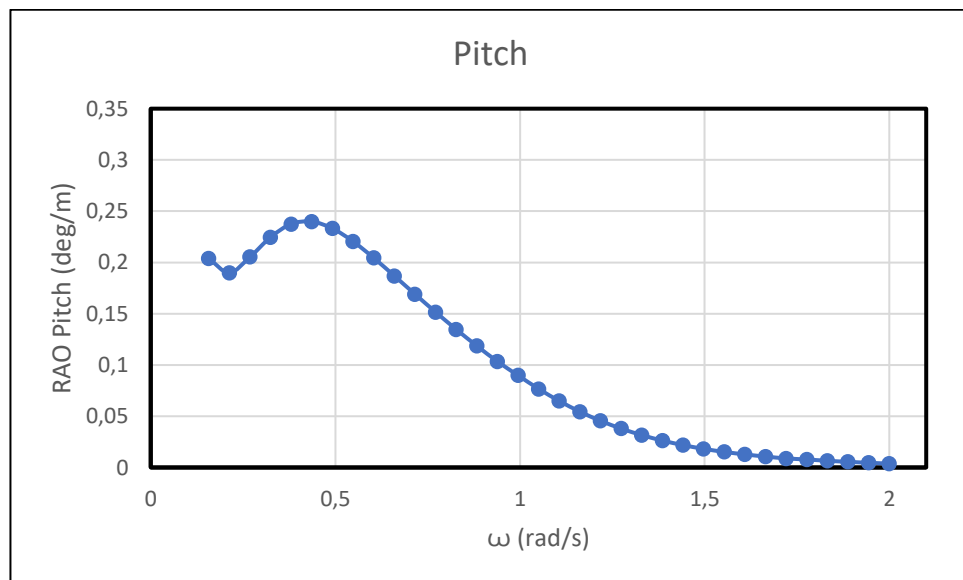
RAO pada mode gerak surge dari SPAR ditampilkan pada gambar 4.29



Gambar 4.29 RAO *free floating* gerakan surge

c. Mode Gerakan Pitch

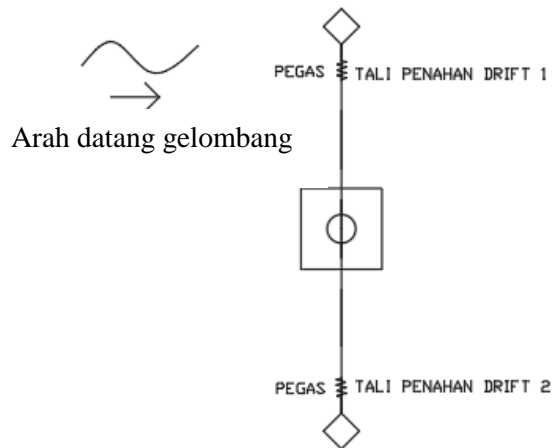
RAO pada mode gerak pitch dari SPAR ditampilkan pada gambar 4.30



Gambar 4.30 RAO *free floating* gerakan pitch

4.5.2. Metode Eksperimen

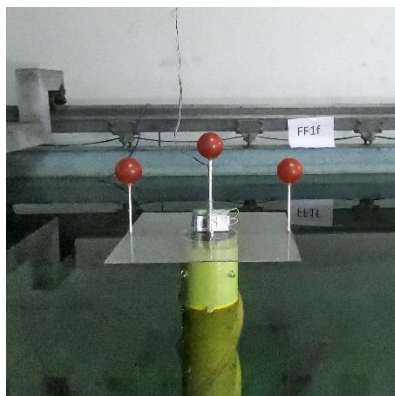
Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan menggunakan kolam berdimensi panjang 100 m, lebar 3 m, dan tinggi 1.8 m. Eksperimen SPAR pada kondisi terapung bebas dilakukan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.31.



Gambar 4.31 Konfigurasi tali penahan *drift*

Dua buah tali penahan *drift* digunakan untuk menjaga struktur agar tetap sesuai dengan arah dan posisi yang diinginkan. Tali penahan *drift* dipasang renggang, hal ini dipasang sedemikian hingga agar tali tidak mempengaruhi gerak struktur, namun apabila terjadi *drifting* yang mengakibatkan bergesernya model maka tali akan menahannya.

Model akan dikenai gelombang yang dibangkitkan oleh *wave maker*. Model akan dikenai tujuh gelombang dengan karakteristik seperti pada Tabel 4.33. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan besar tinggi gelombang konstan yaitu 5 cm. Penentuan periode gelombang ditentukan dengan melakukan penskalaan periode gelombang lingkungan menjadi periode gelombang eksperimen.



Gambar 4.32 Model SPAR kondisi *free floating* dan kode eksperimen



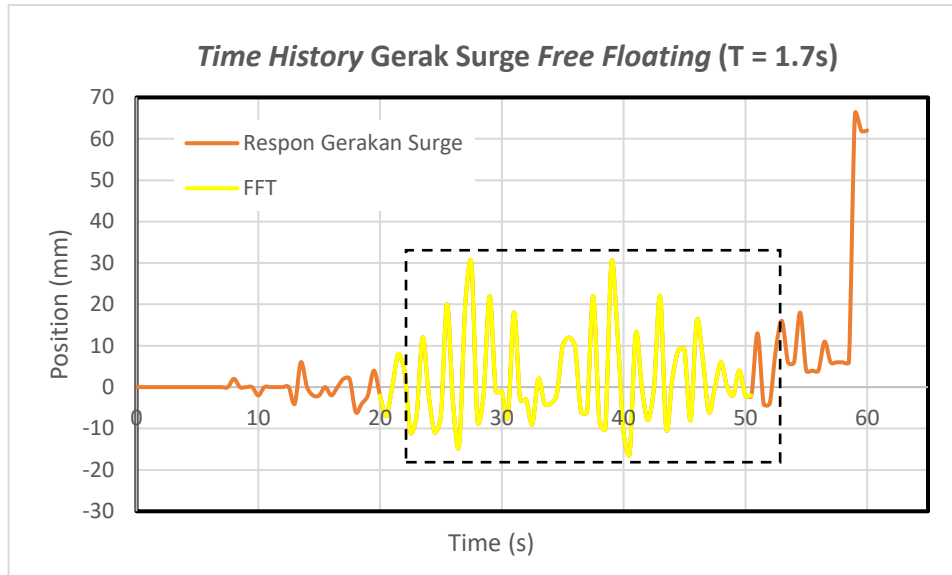
Gambar 4.33 Penempatan kamera dan lampu untuk penerangan

Setiap eksperimen mempunyai identitas eksperimen masing-masing. Kode eksperimen digunakan untuk setiap kondisi seperti pada gambar 4.32 dan penempatan lampu untuk penerangan seperti pada gambat 4.33.

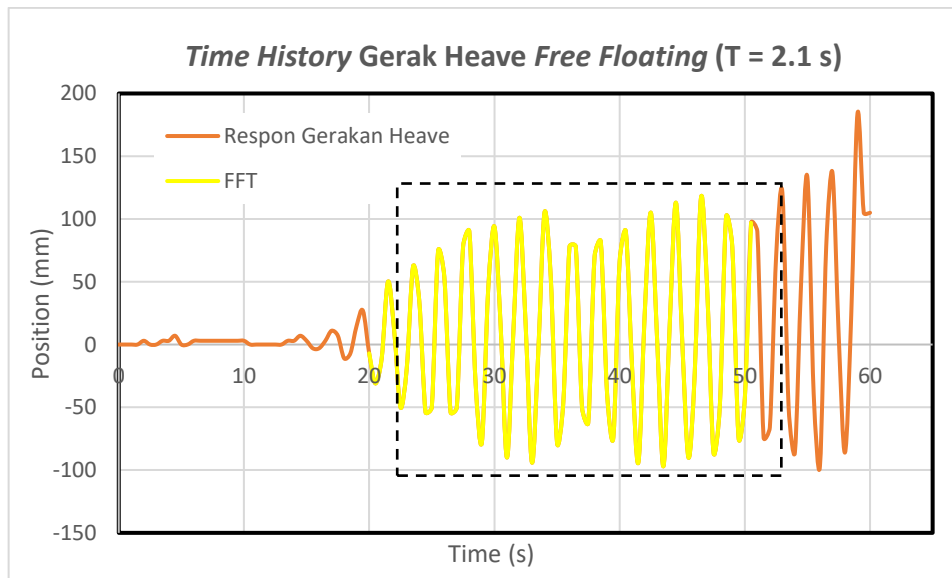
Tabel 4.33 Karakteristik Gelombang Eksperimen *Free Floating*

No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	FF1a	40	3.60	2.5
2	FF1b	29	2.60	
3	FF1c	23.5	2.10	
4	FF1d	19	1.70	
5	FF1e	14.5	1.30	
6	FF1f	12.3	1.10	
7	FF1g	5.5	0.50	

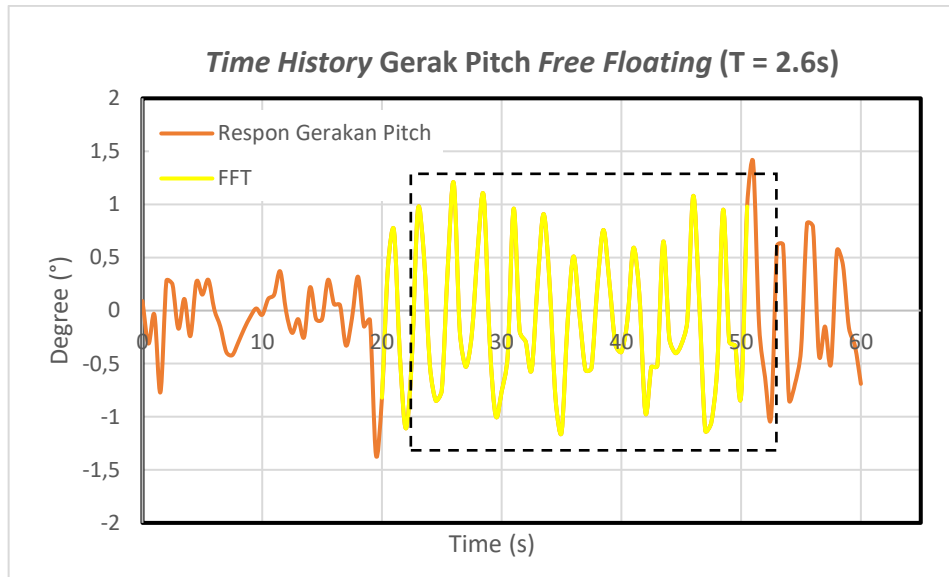
Respon dari model yang terkena gelombang akan dicatat dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat respon dari mode gerak *surge* dan *heave* sedangkan *gyroscope* akan mencatat mode gerak *pitch* dari model. Gambar 4.34, 4.35 dan 4.36 dibawah ini merupakan salah satu contoh dari *time history* keluaran instrumen.



Gambar 4.34 Time history instrumen *image processing* untuk gerakan surge



Gambar 4.35 Time history instrument *image processing* untuk gerakan heave



Gambar 4.36 *Time history* instrument gyroscope untuk gerakan pitch

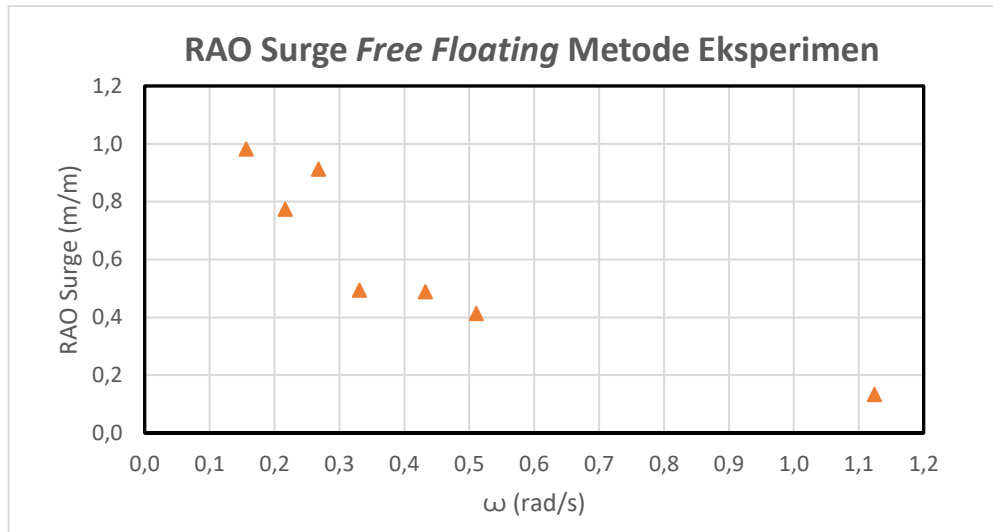
a. Mode Gerak Surge

Setiap *time history* pada gerak surge dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) dari setiap *time history* gerakan untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. Tabel 4.34 menunjukkan RAO gerak dan periode gelombang eksperimen.

Tabel 4.34 RAO surge *free floating* metode eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Surge (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	FF1a	0.9823	3.60
2	FF2a	0.7734	2.60
3	FF3a	0.9120	2.10
4	FF4a	0.4934	1.70
5	FF5a	0.4884	1.30
6	FF6a	0.4133	1.10
7	FF7a	0.1328	0.50

Kolom RAO pada Tabel 4.34 kemudian di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak surge metode eksperimen yang disajikan pada gambar 4.37 berikut ini.



Gambar 4.37 Grafik RAO surge hasil eksperimen

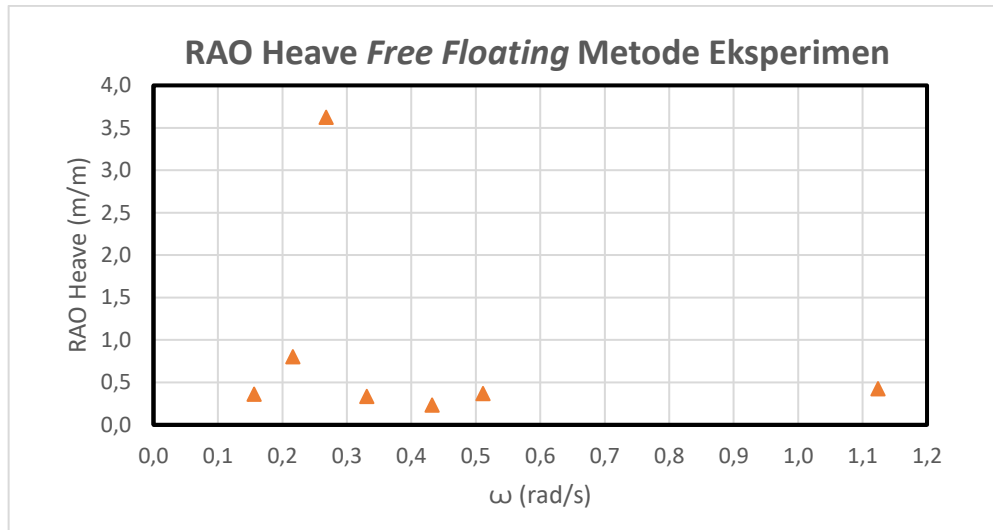
b. Mode Gerak Heave

Setiap *time history* pada gerak heave dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. Tabel 4.35 menunjukkan RAO gerak dan periode gelombang eksperimen.

Tabel 4.35 RAO heave *free floating* metode eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Heave (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	FF1a	0.3613	3.60
2	FF2a	0.8000	2.60
3	FF3a	3.6231	2.10
4	FF4a	0.3336	1.70
5	FF5a	0.2320	1.30
6	FF6a	0.3688	1.10
7	FF7a	0.4240	0.50

Kolom RAO pada Tabel 4.35 kemudian di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak heave metode eksperimen yang disajikan pada gambar 4.38 berikut ini.



Gambar 4.38 Grafik RAO *heave* hasil eksperimen

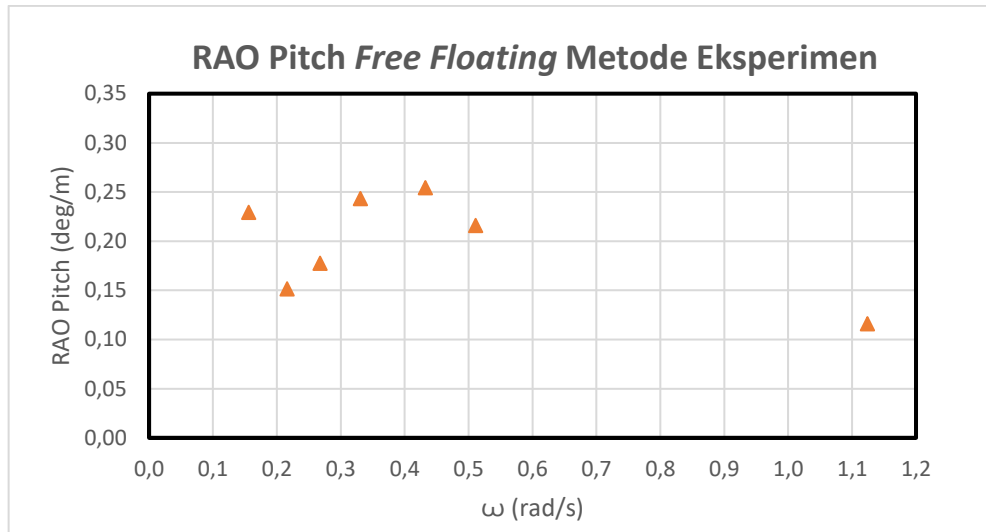
c. Mode Gerak Pitch

Setiap *time history* pada gerak pitch dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. Tabel 4.36 menunjukkan RAO gerak dan periode gelombang eksperimen.

Tabel 4.36 RAO pitch *free floating* metode eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Pitch (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	FF1a	0.2291	3.60
2	FF2a	0.1514	2.60
3	FF3a	0.1774	2.10
4	FF4a	0.2433	1.70
5	FF5a	0.2543	1.30
6	FF6a	0.2159	1.10
7	FF7a	0.1159	0.50

Kolom RAO pada Tabel 4.36 kemudian di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak pitch metode eksperimen yang disajikan pada gambar 4.39 berikut ini.

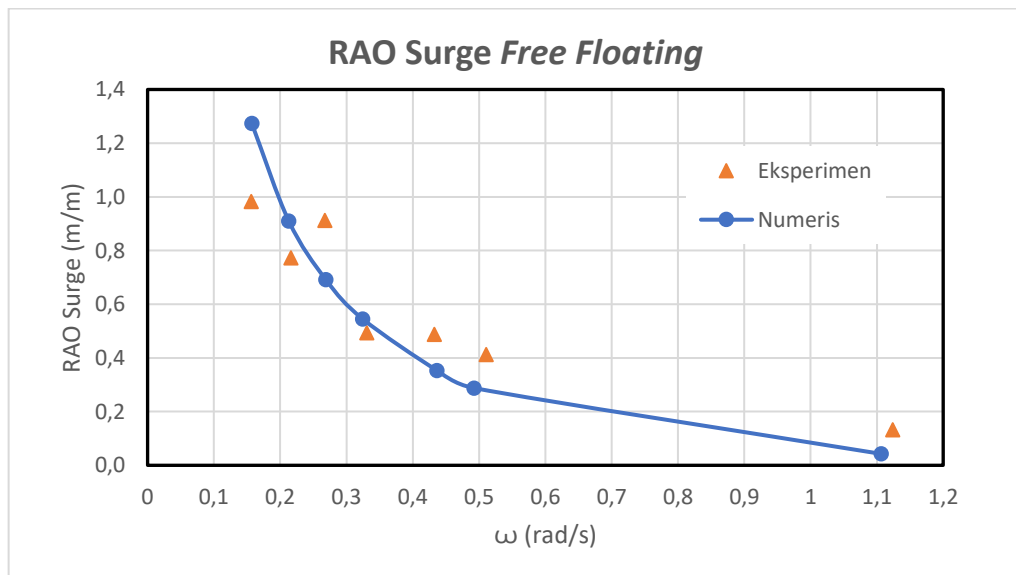


Gambar 4.39 Grafik RAO pitch hasil eksperimen

4.5.3. Perbandingan RAO Metode Numerik dan Eksperimen

Gambar 4.40, 4.41 dan 4.42 menunjukkan perbandingan RAO terapung bebas pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode numerik dan eksperimen untuk tiap gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch* yang terjadi.

a. Mode Gerak Surge



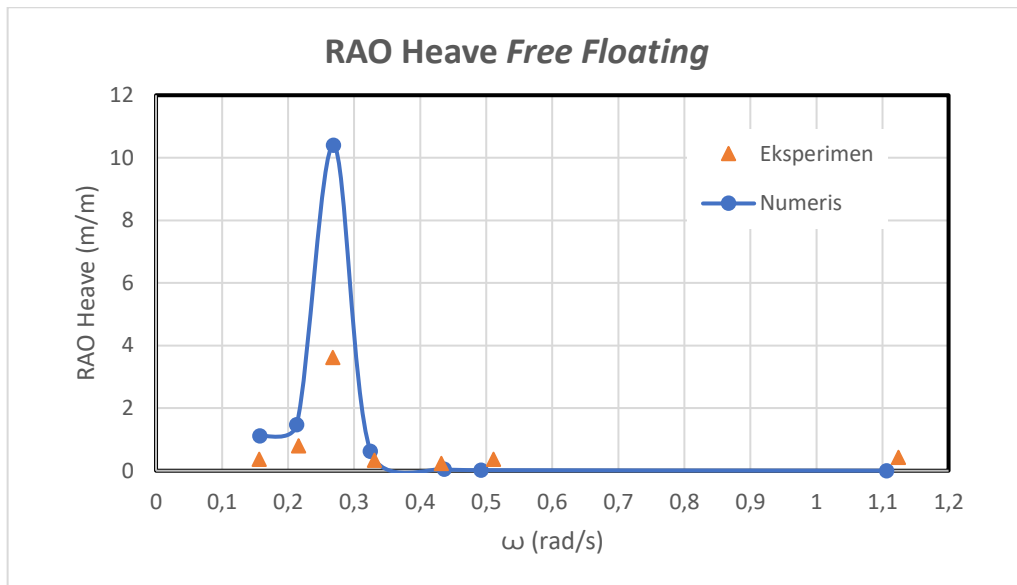
Gambar 4.40 Perbandingan RAO surge *free floating* metode numerik dan eksperimen

Tabel 4.37 menunjukkan perbandingan RAO surge *free floating* dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Analisa metode numerik dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, 0.1571 rad/s. RAO terbesar yang terjadi pada analisa numerik sebesar 1.2742 m/m dan pada perhitungan eksperimen sebesar 0.9823 m/m.

Tabel 4.37 Perbandingan RAO surge *free floating* metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.1571	1.2742
Eksperimen	0.1571	0.9823

b. Mode Gerak Heave



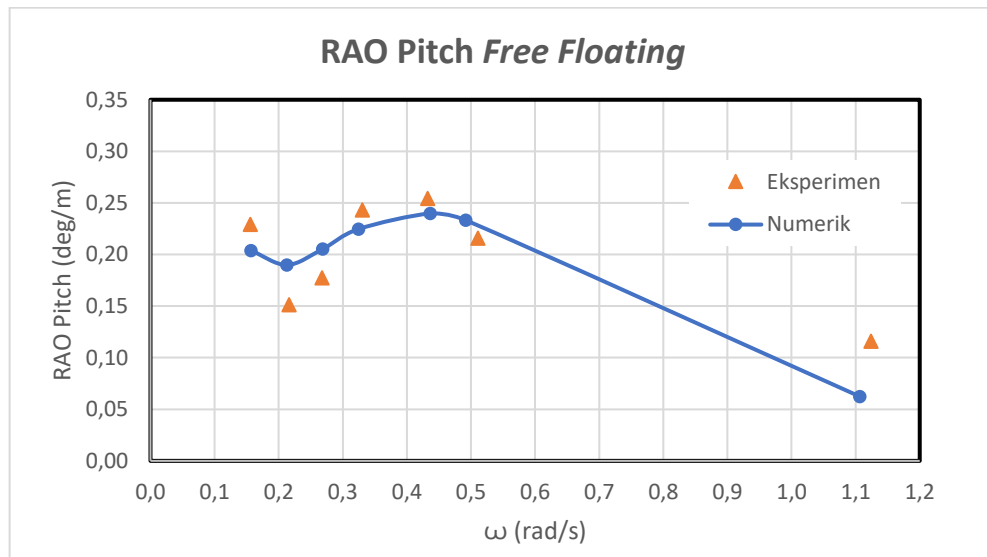
Gambar 4.41 Perbandingan RAO heave *free floating* metode numerik dan eksperimen

Tabel 4.38 menunjukkan perbandingan RAO heave *free floating* dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Analisa metode numeris dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, yakni 0.2688 rad/s. RAO terbesar yang terjadi pada perhitungan numerik sebesar 10.4024 m/m dan pada perhitungan eksperimen sebesar 3.6231 m/m.

Tabel 4.38 Perbandingan RAO heave *free floating* metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numeris	0.2688	10.4024
Eksperimen	0.2688	3.6231

c. Mode Gerak Pitch



Gambar 4.42 Perbandingan RAO pitch *free floating* metode numerik dan eksperimen

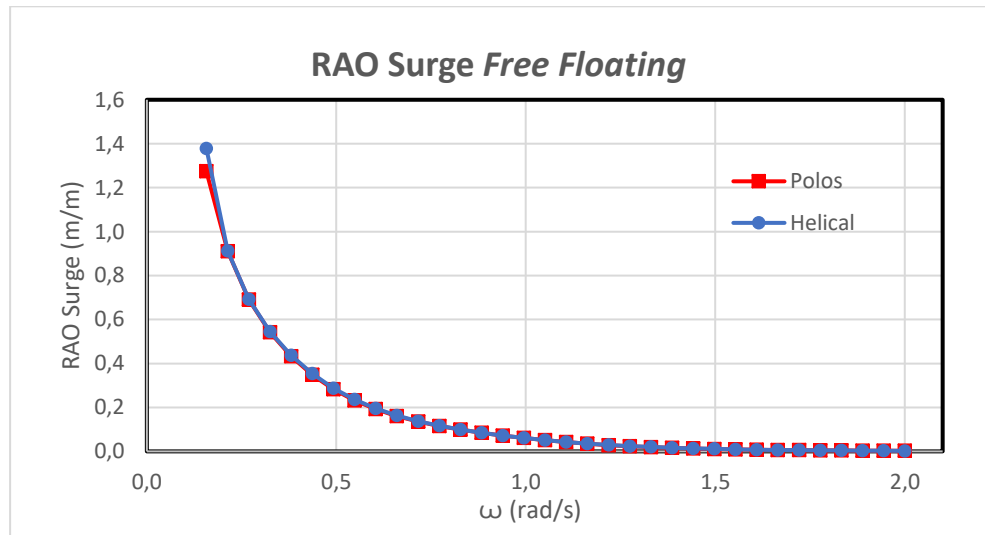
Tabel 4.40 menunjukkan perbandingan RAO pitch *free floating* dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Analisa metode numerik dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, yakni 0.4363 rad/s. RAO terbesar yang terjadi pada perhitungan numerik sebesar 0.2598 deg/m dan pada perhitungan eksperimen sebesar 0.2543 m/m.

Tabel 4.39 Perbandingan RAO pitch *free floating* metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
Numeris	0.4363	0.2398
Eksperimen	0.4363	0.2543

4.5.4. Perbandingan RAO SPAR *Helical Strakes* dan Tanpa *Helical Strakes*

Gambar 4.43, 4.44, dan 4.45 menunjukkan perbandingan RAO terapung bebas SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode numerik untuk tiap gerakan surge, heave, dan pitch yang terjadi.

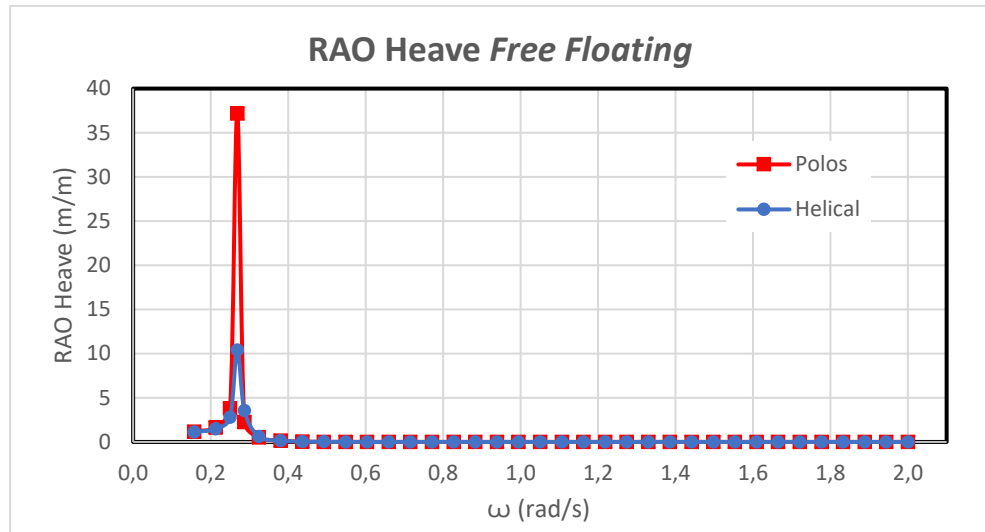


Gambar 4.43 Perbandingan RAO surge *free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

Tabel 4.41 menunjukkan perbandingan RAO surge *free floating* dari setiap struktur SPAR yang dianalisa. Hasil analisa menunjukkan SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* memiliki posisi frekuensi natural yang sama, yakni 0.1571 rad/s. RAO terbesar yang terjadi pada SPAR *helical strakes* sebesar 1.3789 m/m dan tanpa *helical strakes* sebesar 1.373 m/m.

Tabel 4.40 Perbandingan RAO surge *free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.1571	1.3789
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.1571	1.2742

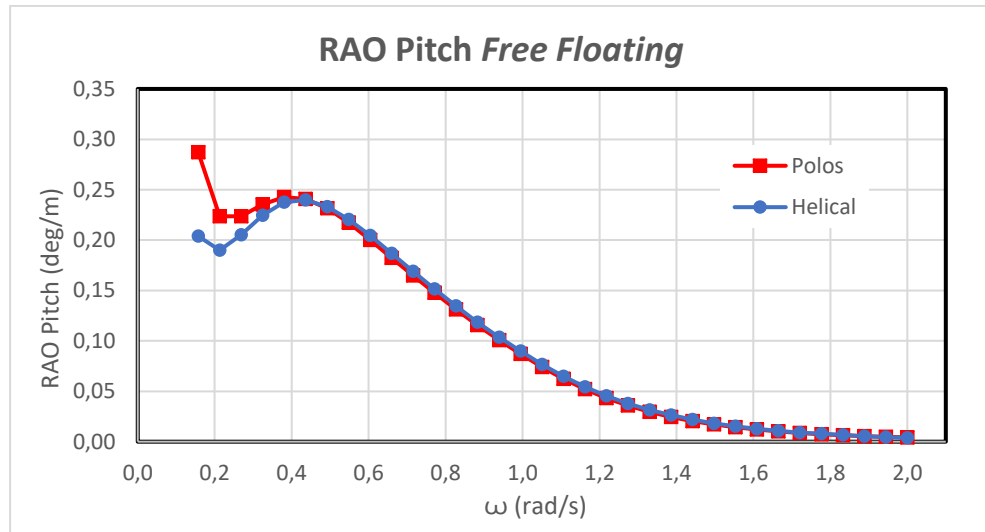


Gambar 4.44 Perbandingan RAO heave *free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

Tabel 4.41 menunjukkan perbandingan RAO heave *free floating* dari setiap struktur SPAR yang dianalisa. Hasil analisa menunjukkan SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* memiliki posisi frekuensi natural yang sama, yakni 0.2688 rad/s. RAO terbesar yang terjadi pada SPAR *helical strakes* sebesar 10.4024 m/m dan tanpa *helical strakes* sebesar 37.1805 m/m.

Tabel 4.41 Perbandingan RAO heave *free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.2688	10.4024
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.2688	37.1805



Gambar 4.45 Perbandingan RAO pitch *free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

Tabel 4.42 menunjukkan perbandingan RAO pitch *free floating* dari setiap struktur SPAR yang dianalisa. Hasil analisa menunjukkan SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* memiliki posisi frekuensi natural yang berbeda, dimana SPAR *helical strakes* pada 0.4363 rad/s dan tanpa *helical strakes* pada 0.1571 rad/s. RAO terbesar yang terjadi pada SPAR *helical strakes* sebesar 10.4024 m/m dan tanpa *helical strakes* sebesar 35.5342 m/m.

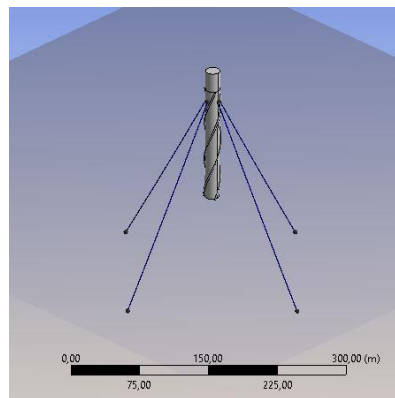
Tabel 4.42 Perbandingan RAO pitch *free floating* metode numerik dan eksperimen

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.4363	0.2398
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.1571	0.2873

4.6. RAO TERTAMBAT

4.6.1. Metode Numerik

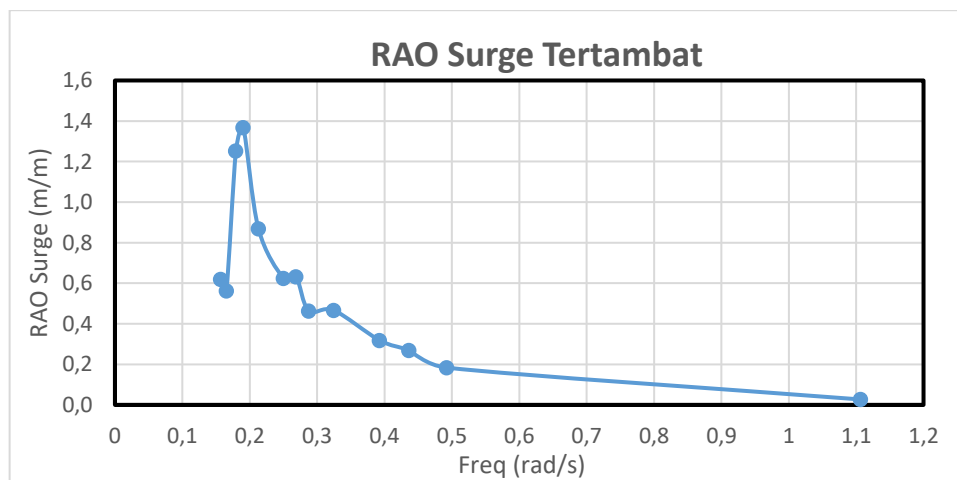
Analisa numerik gerak bangunan apung kondisi tertambat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA. Metode yang digunakan relatif sama dengan kondisi terapung bebas, tetapi dengan penambahan tali tambat dan parameternya. Analisa numerik dilakukan perhitungan dari arah datang gelombang 0 derajat. Gambar 4.46 menunjukkan pemodelan kondisi tertambat pada perangkat lunak ANSYS AQWA.



Gambar 4.46 Kondisi tertambat dalam ANSYS AQWA

a. Mode Gerak Surge

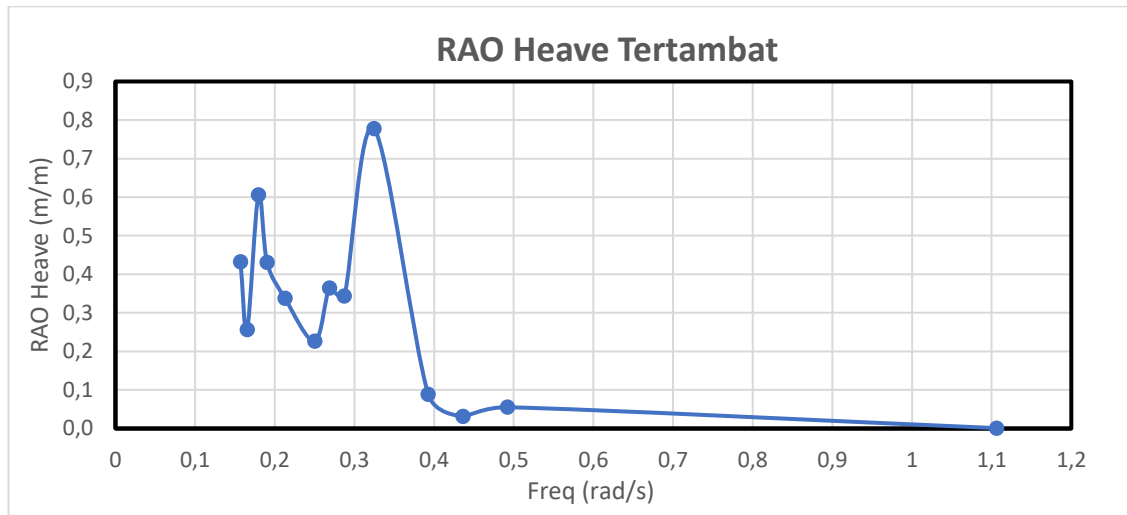
Gambar 4.47 menunjukkan RAO mode gerak surge tertambat dari SPAR metode numerik dengan arah datang gelombang 0 derajat.. RAO tertinggi dari mode gerak surge tertambat secara numerik pada frekuensi 0.1903 rad/s sebesar 1.367 m/m.



Gambar 4.47 RAO tertambat gerakan surge

b. Mode Gerak Heave

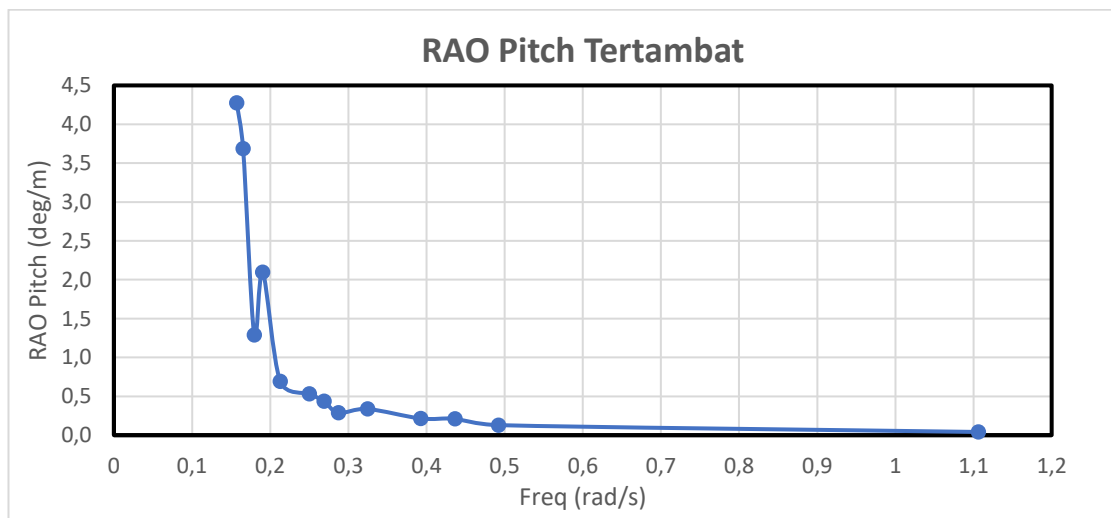
Gambar 4.48 menunjukkan RAO mode gerak heave tertambat dari SPAR metode numerik dengan arah datang gelombang 0 derajat.. RAO tertinggi dari mode gerak heave tertambat secara numerik pada frekuensi 0.3245 rad/s sebesar 0.778 m/m.



Gambar 4.48 RAO tertambat gerakan heave

c. Mode Gerak Pitch

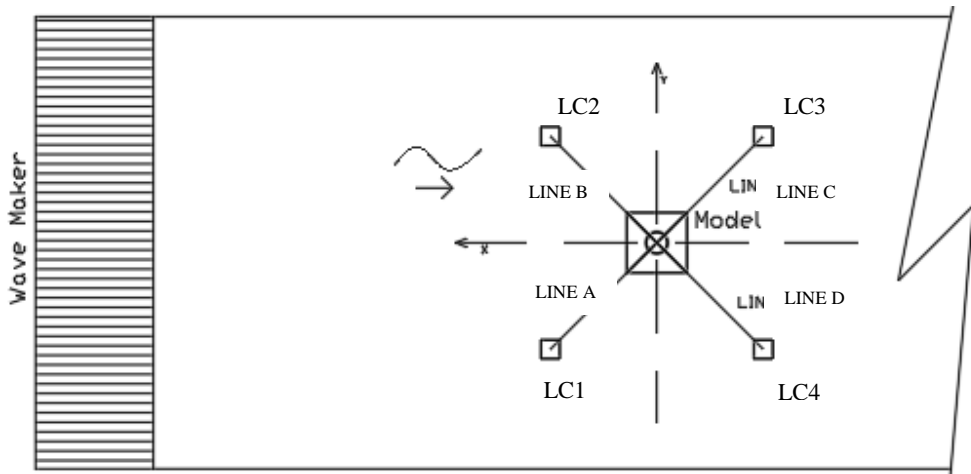
Gambar 4.49 menunjukkan RAO mode gerak pitch tertambat dari SPAR metode numerik dengan arah datang gelombang 0 derajat.. RAO tertinggi dari mode gerak pitch tertambat secara numerik pada frekuensi 0.157 rad/s sebesar 4.267 m/m.



Gambar 4.49 RAO tertambat gerakan pitch

4.6.2. Metode Eksperimen

Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan menggunakan kolam berdimensi panjang 100 m, lebar 3 m, dan tinggi 1.8 m. Eksperimen SPAR pada kondisi tertambat dilakukan dengan konfigurasi seperti pada gambar 4.50. SPAR dalam kondisi tertambat di laboratorium Hidrodinamika ITS ditunjukkan pada gambar 4.51.



Gambar 4.50 Konfigurasi eksperimen model fisik tertambat



Gambar 4.51 Eksperimen SPAR Tertambat

Sebanyak empat buah tali tambat yang digunakan, diatur dengan panjang yang sama dan dipasang dengan kondisi *taut*. Tali tambat dihubungkan pada *load cell* yang berada pada jangkar yang telah berada di dasar kolam untuk mencatat tegangan tali yang terjadi.

Model akan dikenai gelombang yang dibangkitkan oleh *wave maker*. Model akan dikenai 7 gelombang dengan karakteristik seperti pada tabel 4.43. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan tinggi gelombang konstan yakni 5 cm. Penentuan periode gelombang ditentukan dengan melakukan penskalaan periode gelombang lingkungan menjadi periode gelombang eksperimen.

Tabel 4.43 Karakteristik Gelombang Eksperimen Tertambat

No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	TT1a	40	3.60	2.5
2	TT1b	29	2.60	
3	TT1c	23.5	2.10	
4	TT1d	19	1.70	
5	TT1e	14.5	1.30	
6	TT1f	12.3	1.10	
7	TT1g	5.5	0.50	

Respon dari model yang mengenai gelombang akan dicatat dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat respon mode gerak surge dan heave, sedangkan *gyroscope* akan mencatat mode gerak pitch struktur. Sama seperti metode *free floating*, *time history* dari setiap gerakan kemudian dianalisa menggunakan metode FFT (*Fast Fourier Transform*).

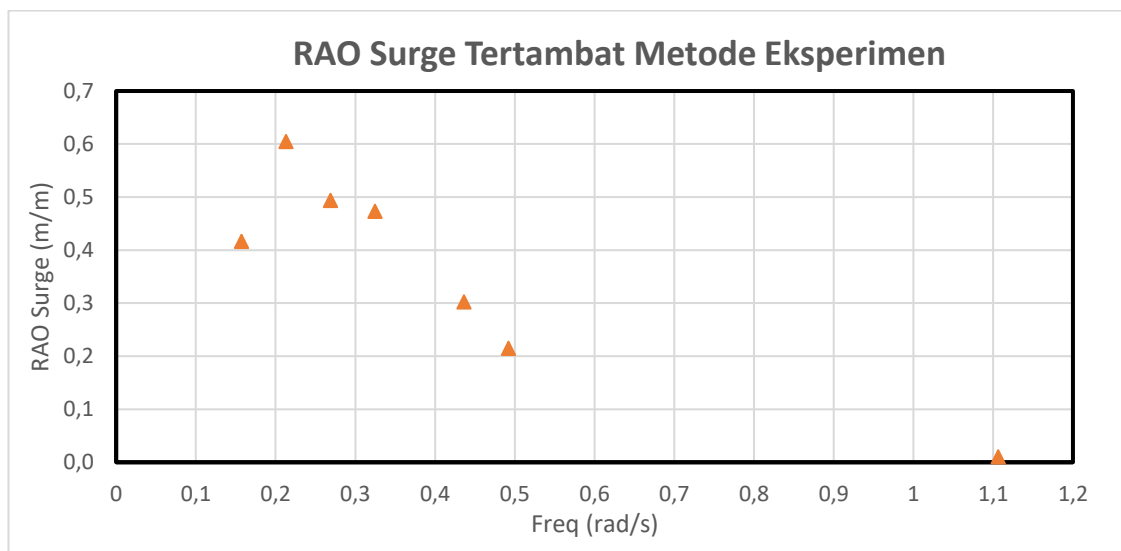
a. Mode Gerak Surge

Setiap *time history* pada gerak surge dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. Tabel 4.44 menunjukkan RAO gerak dan periode gelombang dari eksperimen.

Tabel 4.44 RAO surge tertambat metode eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Surge (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	0.417	3.60
2	TT2a	0.605	2.60
3	TT3a	0.494	2.10
4	TT4a	0.474	1.70
5	TT5a	0.303	1.30
6	TT6a	0.215	1.10
7	TT7a	0.011	0.50

Kolom RAO pada Tabel 4.44 kemudian di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak surge metode eksperimen yang disajikan pada gambar 4.52 berikut ini.



Gambar 4.52 RAO tertambat surge hasil eksperimen

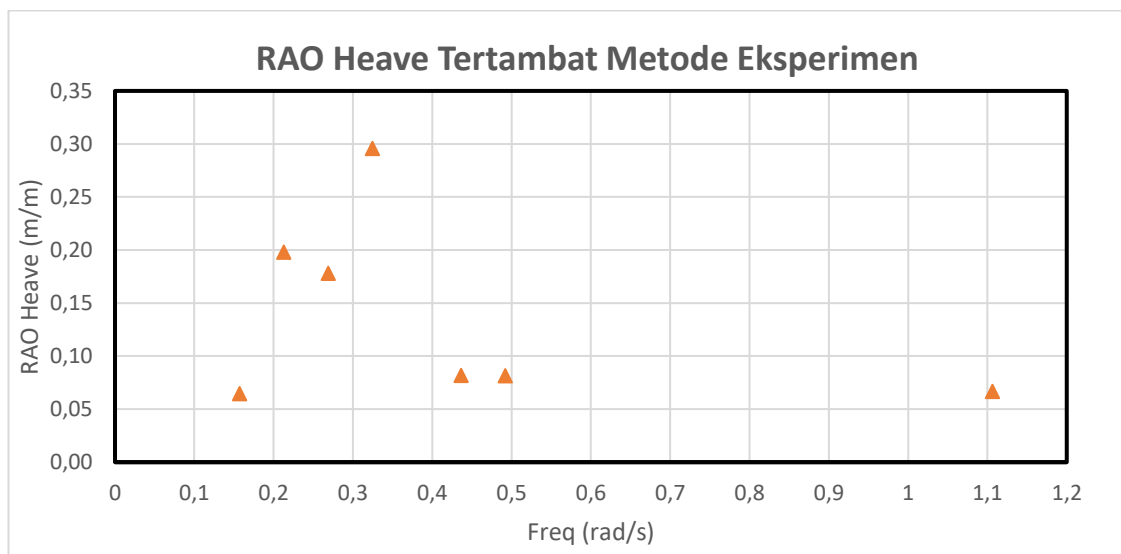
b. Mode Gerak Heave

Setiap *time history* pada gerak heave dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. Tabel 4.45 menunjukkan RAO gerak dan periode gelombang eksperimen.

Tabel 4.45 RAO heave tertambat metode eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Heave (m/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	0.064	3.60
2	TT2a	0.197	2.60
3	TT3a	0.177	2.10
4	TT4a	0.295	1.70
5	TT5a	0.082	1.30
6	TT6a	0.081	1.10
7	TT7a	0.066	0.50

Kolom RAO pada Tabel 4.45 kemudian di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak heave metode eksperimen yang disajikan pada gambar 4.53 berikut ini.



Gambar 4.53 RAO tertambat heave hasil eksperimen

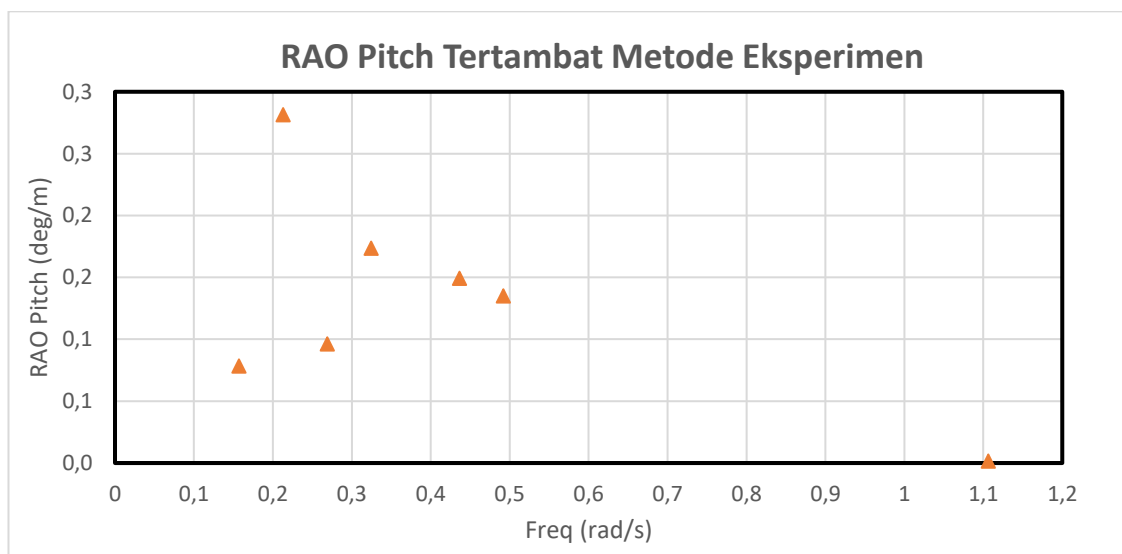
c. Mode Gerak Pitch

Setiap *time history* pada gerak pitch dianalisa tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisa dilakukan dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. Tabel 4.46 menunjukkan RAO gerak dan periode gelombang eksperimen.

Tabel 4.46 RAO pitch tertambat metode eksperimen

No.	Kode	RAO Gerakan Pitch (deg/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	0.078	3.60
2	TT2a	0.281	2.60
3	TT3a	0.096	2.10
4	TT4a	0.173	1.70
5	TT5a	0.149	1.30
6	TT6a	0.135	1.10
7	TT7a	0.001	0.50

Kolom RAO pada Tabel 4.46 kemudian di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak pitch metode eksperimen yang disajikan pada gambar 4.54 berikut ini

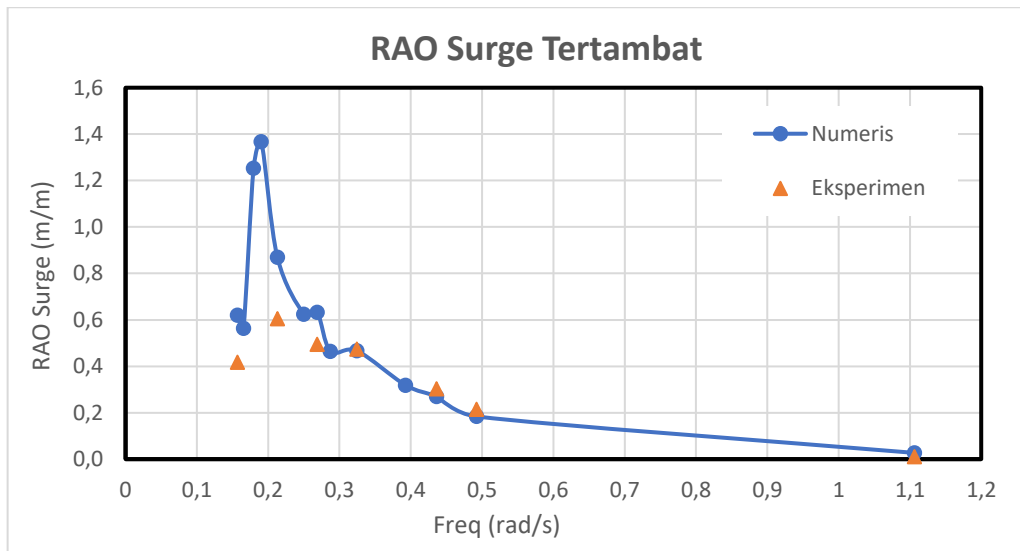


Gambar 4.54 RAO tertambat pitch hasil eksperimen

4.6.3. Perbandingan RAO Tertambat Metode Numerik dan Eksperimen

Gambar 4.55, 4.56, dan 4.57 menunjukkan perbandingan RAO tertambat pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode numerik dan eksperimen untuk tiap gerakan surge, heave, dan pitch yang terjadi.

a. Mode Gerak Surge



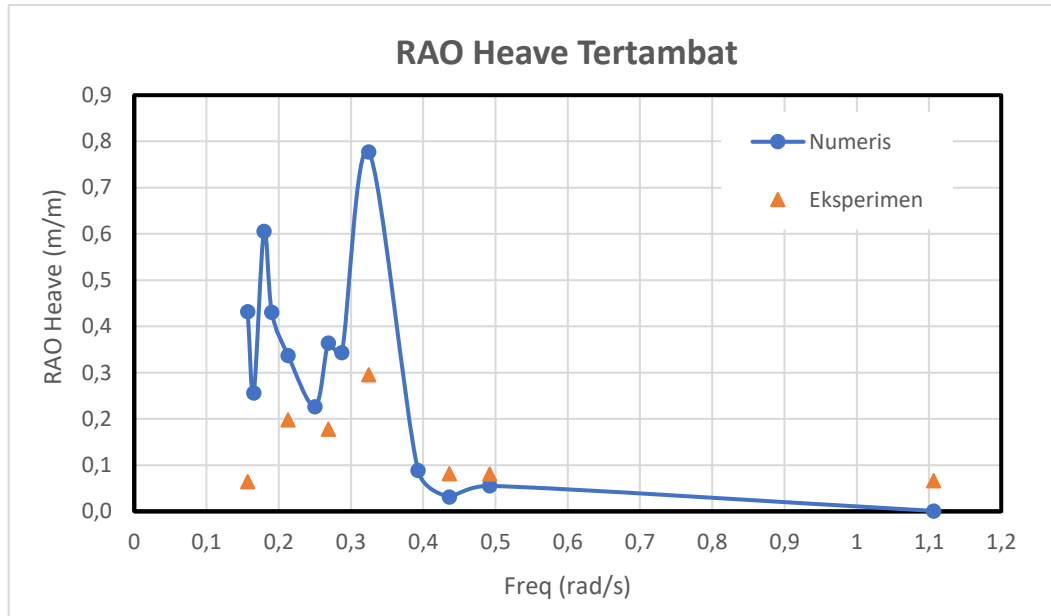
Gambar 4.55 Perbandingan RAO surge tertambat metode numerik dan eksperimen

Tabel 4.47 menunjukkan perbandingan RAO surge tertambat dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Analisa metode numerik dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.1903 rad/s dengan RAO terbesar 1.367 m/m. Metode eksperimen pada frekuensi 0.2129 rad/s dengan RAO terbesar 0.605 m/m.

Tabel 4.47 Perbandingan RAO surge tertambat metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.1903	1.367
Eksperimen	0.2129	0.605

b. Mode Gerak Heave



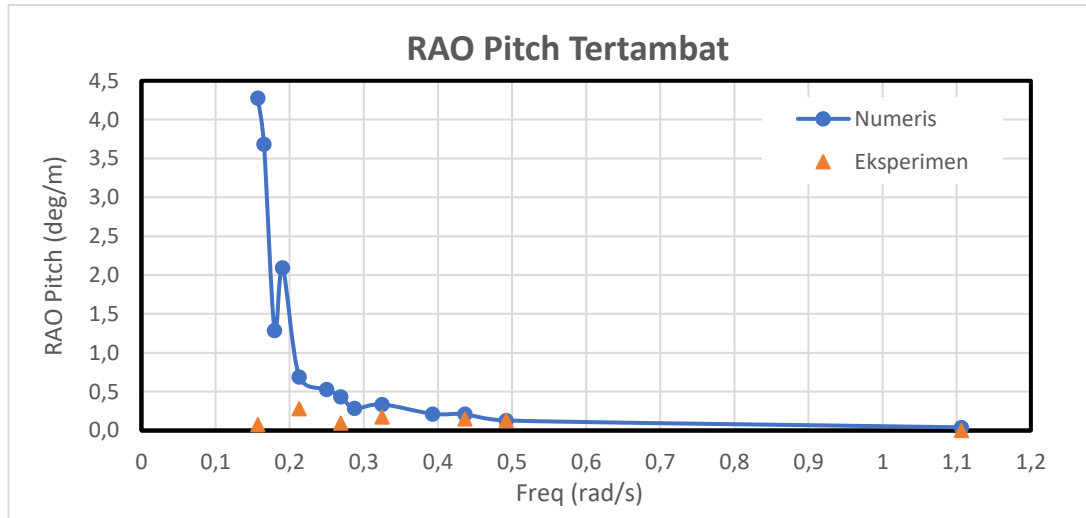
Gambar 4.56 Perbandingan RAO heave tertambat metode numerik dan eksperimen

Tabel 4.48 menunjukkan perbandingan RAO surge tertambat dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Analisa metode numerik dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang sama, yakni 0.3245 rad/s. RAO terbesar yang terjadi pada analisa numerik sebesar 0.778 m/m dan pada perhitungan eksperimen sebesar 0.295 m/m.

Tabel 4.48 Perbandingan RAO heave tertambat metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.3245	0.778
Eksperimen	0.3245	0.295

c. Mode Gerak Pitch



Gambar 4.57 Perbandingan RAO pitch tertambat metode numerik dan eksperimen

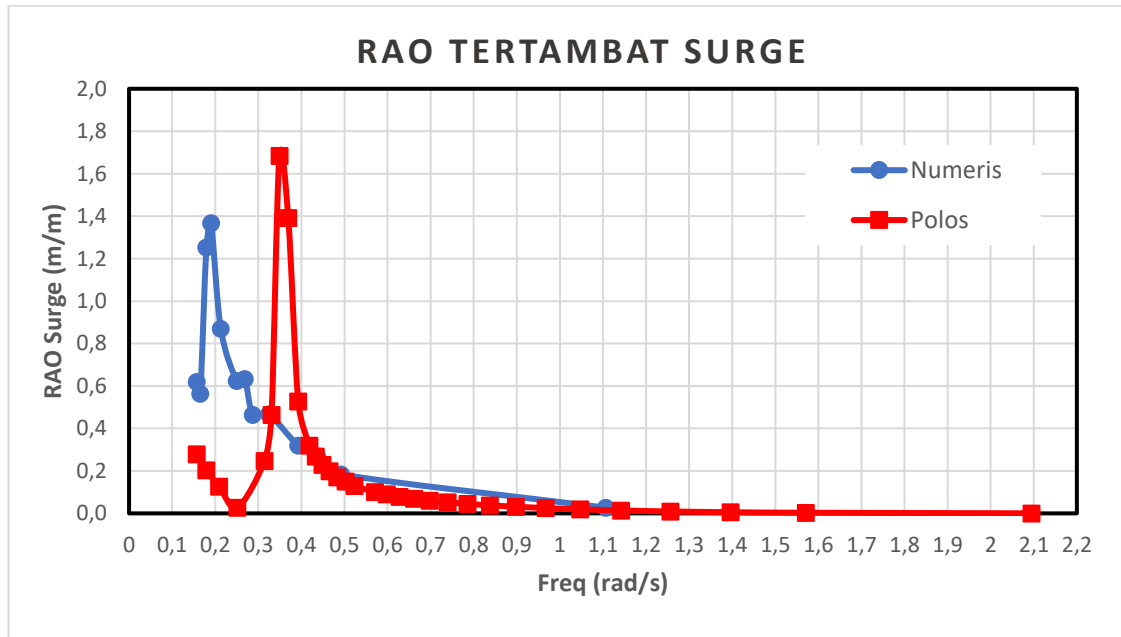
Tabel 4.49 menunjukkan perbandingan RAO surge tertambat dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Analisa metode numerik dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.157 rad/s dengan RAO terbesar 4.276 m/m. Metode eksperimen pada frekuensi 0.212 rad/s dengan RAO terbesar 0.281 m/m.

Tabel 4.49 Perbandingan RAO heave tertambat metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.157	4.276
Eksperimen	0.212	0.281

4.6.4. Perbandingan RAO Tertambat SPAR *Helical Strakes* dan Tanpa *Helical Strakes*

Gambar 4.58, 4.59, dan 4.60 menunjukkan perbandingan RAO tertambat SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode numerik untuk tiap gerakan surge, heave, dan pitch yang terjadi.

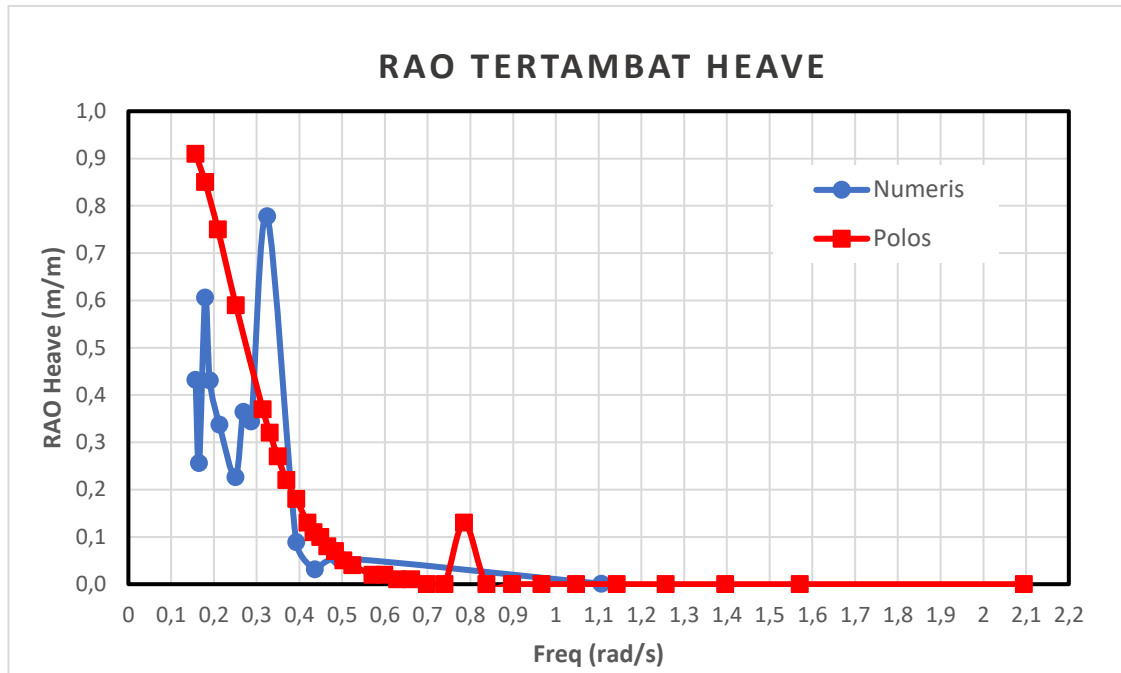


Gambar 4.58 RAO surge tertambat SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

Tabel 4.50 menunjukkan perbandingan RAO surge tertambat dari setiap struktur SPAR. Hasil analisa menunjukkan SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* memiliki posisi frekuensi natural yang berbeda, yakni 0.1903 rad/s pada SPAR *Helical Strakes* dan 0.3492 rad/s pada SPAR tanpa *helical strakes*. RAO terbesar yang terjadi pada SPAR *helical strakes* sebesar 1.367 m/m dan tanpa *helical strakes* sebesar 1.684 m/m.

Tabel 4.50 Perbandingan RAO surge tertambat SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.1903	1.367
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.3492	1.684

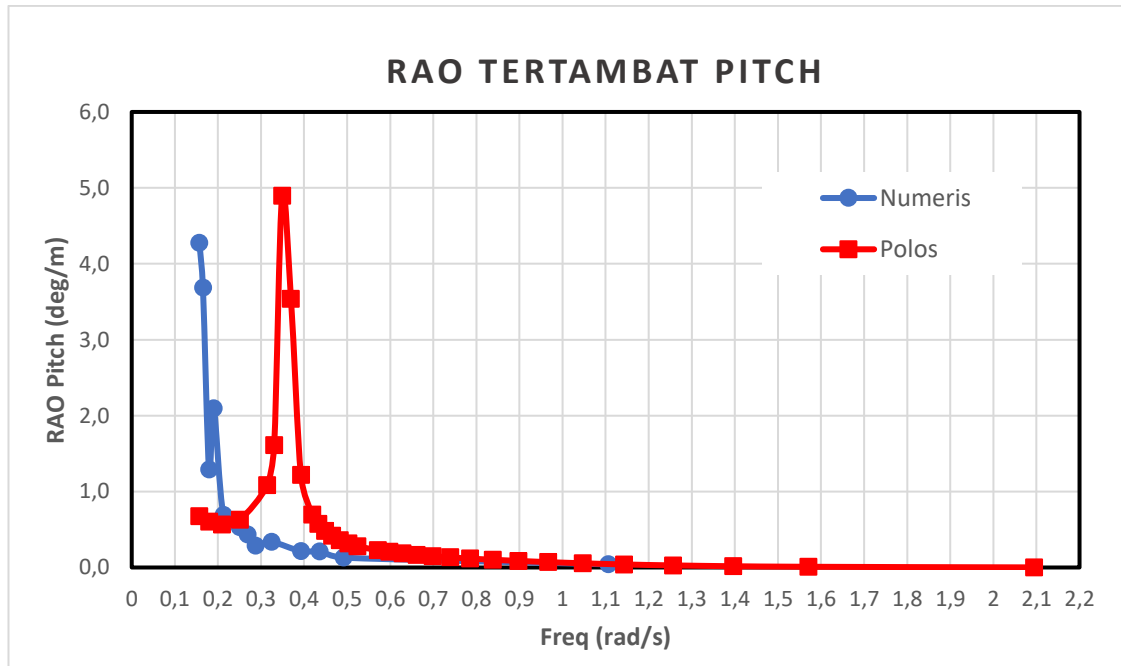


Gambar 4.59 RAO heave tertambat SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

Tabel 4.51 menunjukkan perbandingan RAO heave tertambat dari setiap struktur SPAR. Hasil analisa menunjukkan SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* memiliki posisi frekuensi natural yang berbeda, yakni 0.3245 rad/s pada SPAR *Helical Strakes* dan 0.157 rad/s pada SPAR tanpa *helical strakes*. RAO terbesar yang terjadi pada SPAR *helical strakes* sebesar 0.778 m/m dan tanpa *helical strakes* sebesar 0.91 m/m.

Tabel 4.51 Perbandingan RAO surge tertambat SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.3245	0.778
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.157	0.91



Gambar 4.60 RAO pitch tertambat SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

Tabel 4.52 menunjukkan perbandingan RAO pitch tertambat dari setiap struktur SPAR. Hasil analisa menunjukkan SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* memiliki posisi frekuensi natural yang berbeda, yakni 0.3245 rad/s pada SPAR *Helical Strakes* dan 0.157 rad/s pada SPAR tanpa *helical strakes*. RAO terbesar yang terjadi pada SPAR *helical strakes* sebesar 4.276 deg/m dan tanpa *helical strakes* sebesar 4.896 deg/m.

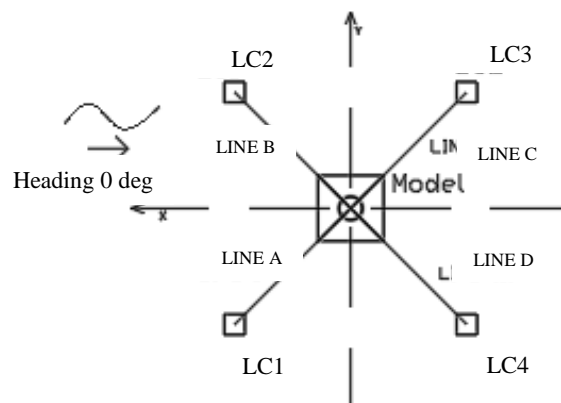
Tabel 4.52 Perbandingan RAO pitch tertambat SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.157	4.276
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.349	4.896

4.7. TEGANGAN TARIK TALI TAMBAT

Tali tambat pada struktur akan mengalami gaya tarik yang besarnya berosilasi sesuai dengan gaya gelombang yang terjadi. Besar gaya tegangan tali yang terjadi diukur dengan menggunakan dua metode yaitu metode numerik dan metode eksperimen. Tegangan tali yang diukur menggunakan metode numerik

dilakukan dengan bantuan perangkat lunak ANSYS AQWA, sedangkan untuk metode eksperimen tegangan tali diukur menggunakan instrumen *load cell* yang mampu mencatat gaya tarik yang terjadi pada tali tambat. Gambar 4.60 merupakan posisi tali tambat yang digunakan pada model baik untuk metode numerik maupun metode eksperimen. Gambar 4.61 merupakan *load cell* yang berada di dasar air kolam uji Laboratorium Hidrodinamika ITS.



Gambar 4.61 Posisi Line A, B, C, dan D



Gambar 4.62 Kondisi jangkar dan load cell dalam air

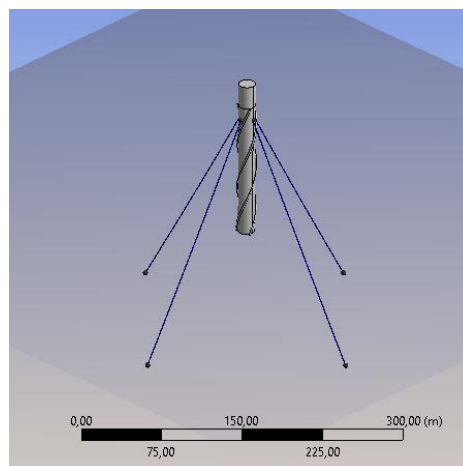
4.7.1. Metode Numerik

Tension tali yang terjadi pada struktur dianalisis menggunakan bantuan perangkat lunak ANSYS AQWA. Properties tali tambat yang ada pada gambar 4.7 dan Tabel 4.19 dimasukkan pada program ANSYS AQWA sehingga dihasilkan *tension* tali yang terjadi per satuan waktu, selanjutnya

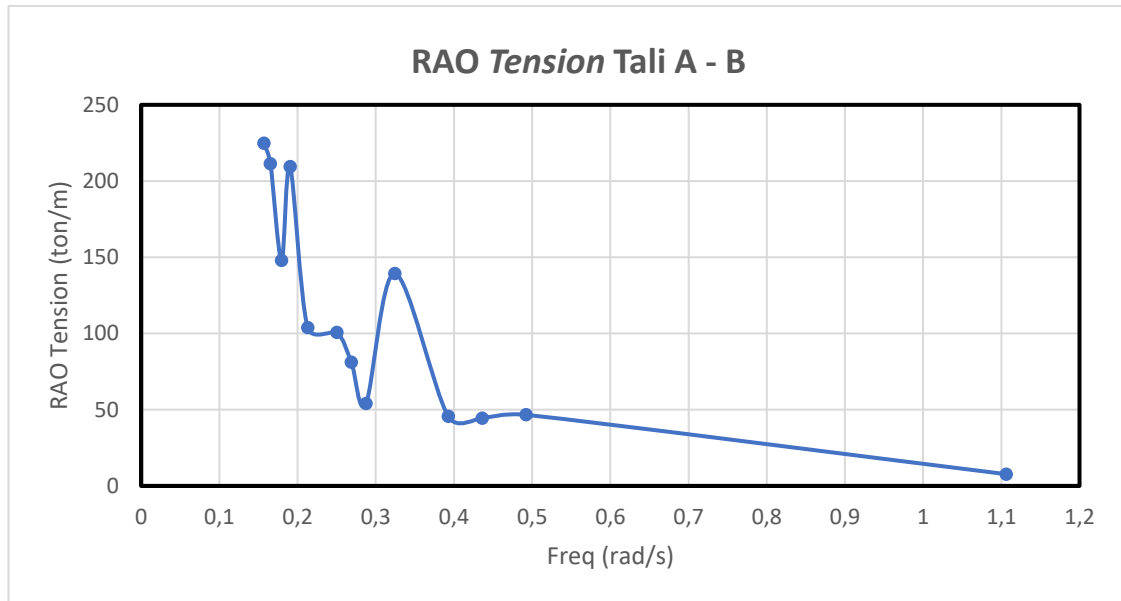
perlu dicari amplitude *tension* pada periode tertentu yang diplot pada frekuensi domain sehingga dihasilkan respon *tension* tali yang terjadi dalam bentuk RAO. Gambar 4.62 berikut ini merupakan permodelan dari tali tambat yang digunakan pada model dengan menggunakan ANSYS AQWA. Gambar 4.63 menunjukkan grafik RAO *tension* tali A dan B, sedangkan gambar 4.64 menunjukkan grafik RAO *tension* tali C dan D. Dari grafik dapat dilihat bahwa *tension* tali yang terjadi pada tali tambat A dan tali tambat B besarnya sama, sedangkan tali tambat C besarnya sama dengan tali tambat D namun lebih kecil dari tali tambat A dan B. Tabel 4.53 menunjukkan *tension* maksimum pada tiap tali tambat dari hasil ANSYS AQWA.

Tabel 4.53 RAO *tension* tiap tali tambat metode numerik

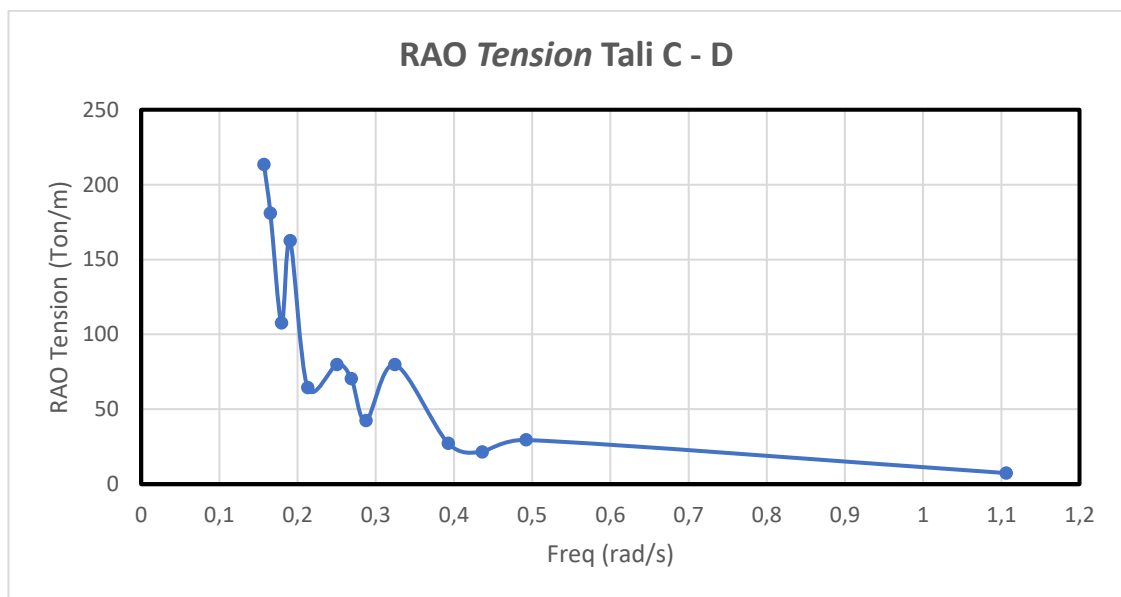
	Frequency (rad/s)	<i>Tension</i> Tali Maksimum (ton/m)
Tali Tambat A	0.157	224.811
Tali Tambat B	0.157	224.811
Tali Tambat C	0.157	213.299
Tali Tambat D	0.157	213.999



Gambar 4.63 Pemodelan tali tambat dengan menggunakan ANSYS AQWA



Gambar 4.64 RAO *tension* tali tambat A dan B metode numerik

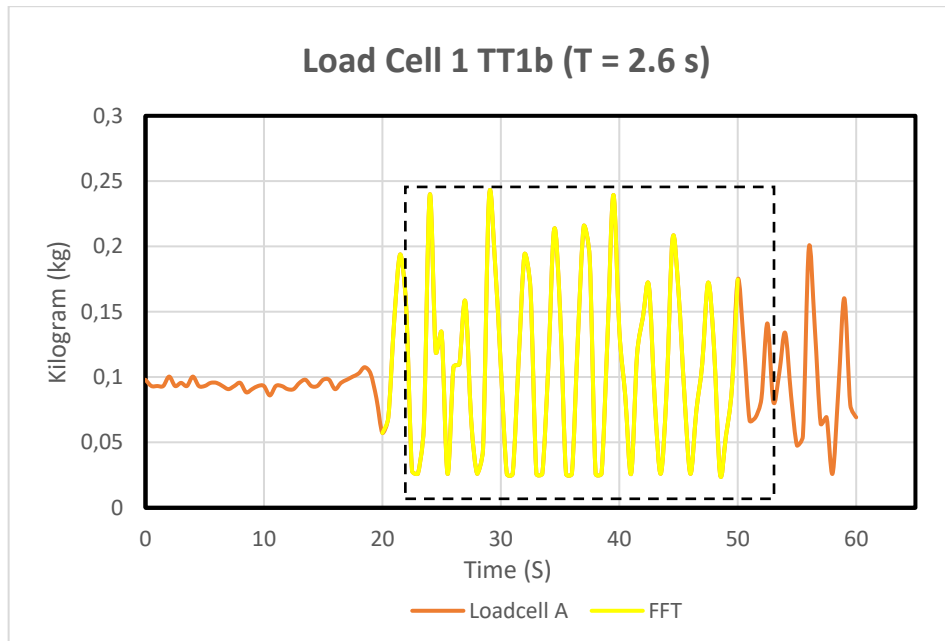


Gambar 4.65 RAO *tension* tali tambat C dan D metode numerik

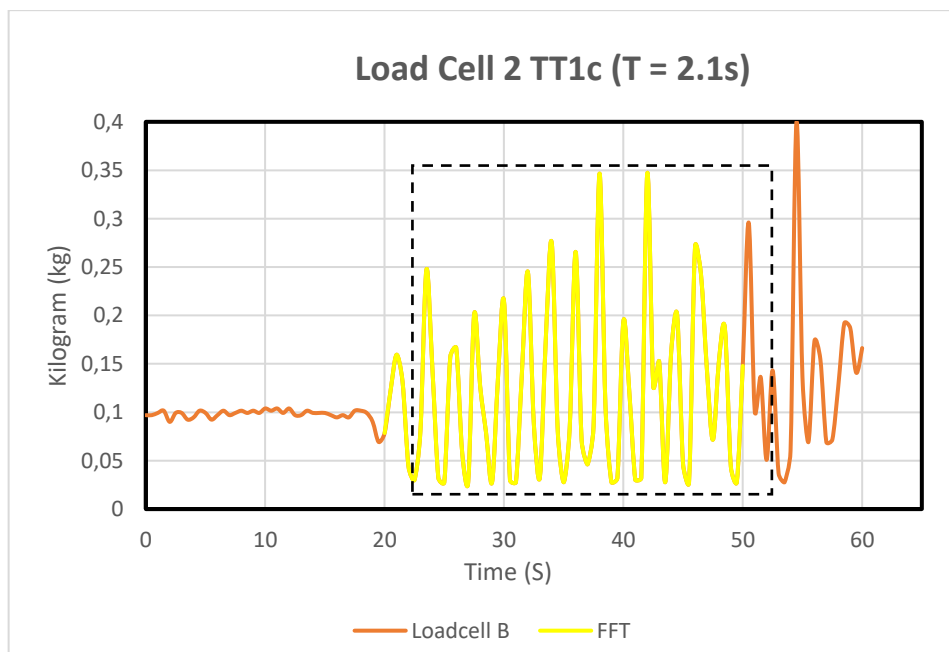
4.7.2. Metode Eksperimen

Analisa eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dengan menggunakan kolam berdimensi panjang 100 m, lebar 3 m, dan tinggi 1.8 m. Pada kondisi tertambat model fisik diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.66 dengan menggunakan empat buah tali tambat. *Load cell* berkapasitas beban tarik 1 kg digunakan pada setiap tali tambat yang terpasang pada model fisik. Model fisik diberi beban gelombang yang dibangkitkan oleh *wave maker*. Model akan dikenai gelombang dari arah 0

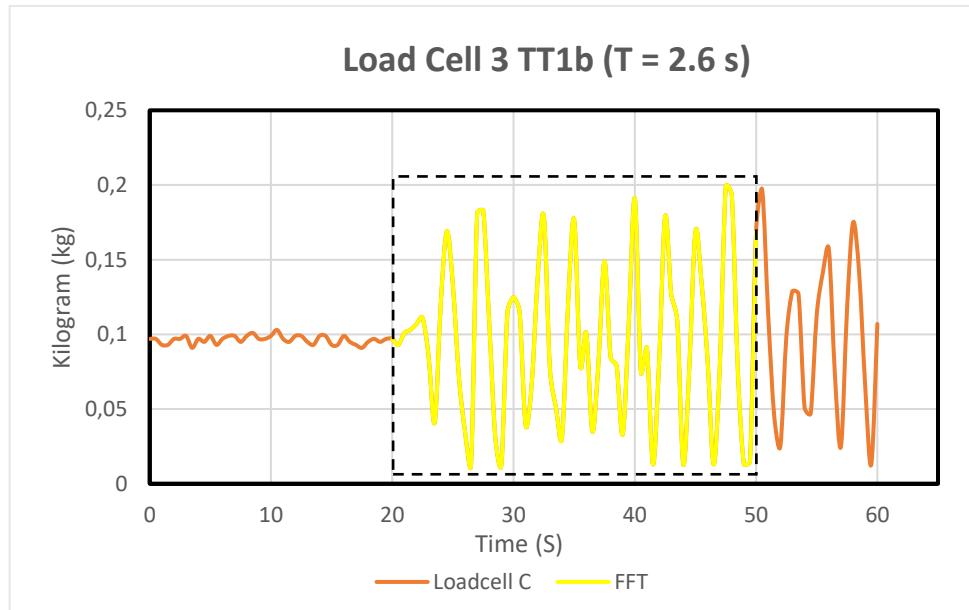
derajat dengan 7 gelombang yang berkarakteristik seperti pada Tabel 4.43. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan besar tinggi gelombang konstan. Respon *tension* tali tambat yang terjadi akibat beban gelombang akan dicatat oleh instrumen *load cell*. Gambar 4.66, 4.67, 4.68, dan 4.69 merupakan salah satu contoh dari *time history* hasil dari instrumen *load cell*.



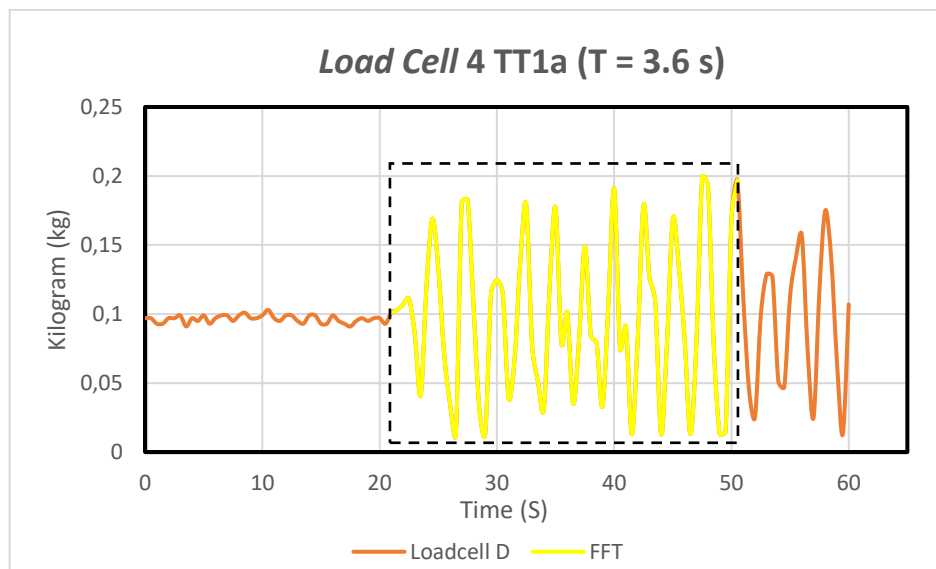
Gambar 4.66 *Time History load cell 1*



Gambar 4.67 *Time History load cell 2*



Gambar 4.68 *Time History load cell 3*



Gambar 4.69 *Time History load cell 4*

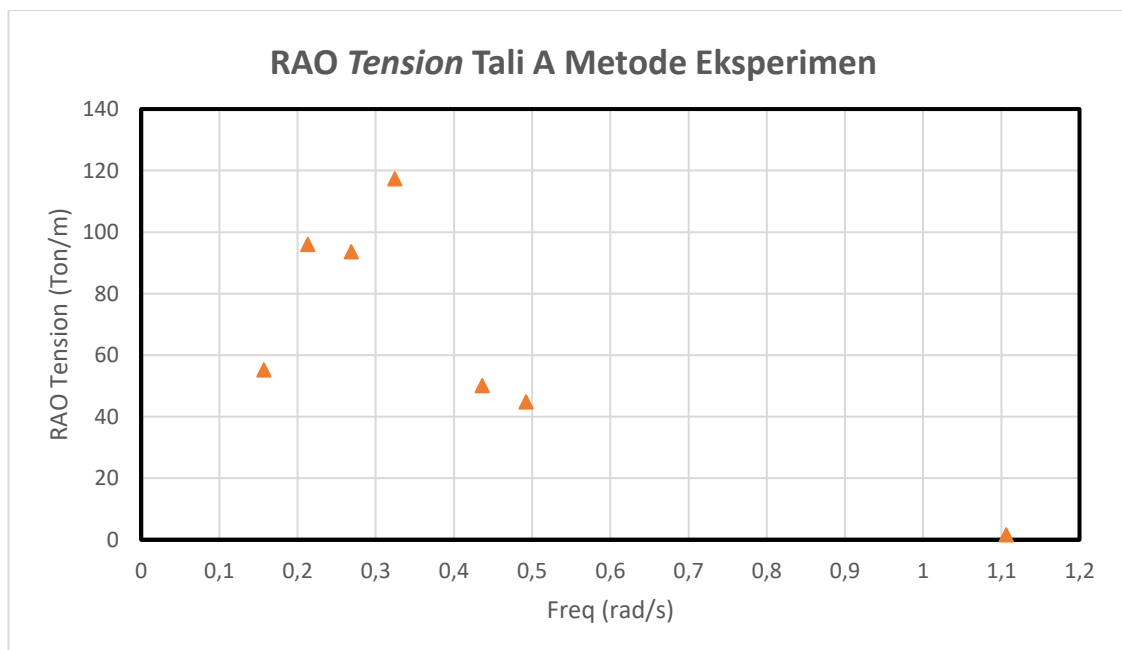
a. *Load Cell 1*

Setiap *time history* pada *tension* tali tambat *load cell 1* dianalisa tinggi respon dan periode respon dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk melihat respon *tension* tali tambat untuk setiap variasi. RAO *tension* tali merupakan perbandingan amplitudo respon *tension* tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.54 menunjukkan RAO *tension* tali dan periode gelombang eksperimen.

Tabel 4.54 RAO *tension* tali *load cell* 1 metode eksperimen

No.	Kode	RAO <i>Tension</i> Tali (ton/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	55.224	3.60
2	TT2a	95.982	2.60
3	TT3a	93.571	2.10
4	TT4a	117.313	1.70
5	TT5a	50.149	1.30
6	TT6a	44.776	1.10
7	TT7a	1.658	0.50

Kolom RAO pada tabel 4.54 kemudia di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari *tension* tali tambat A yang disajikan pada gambar 4.70.



Gambar 4.70 RAO *tension* tali A metode eksperimen

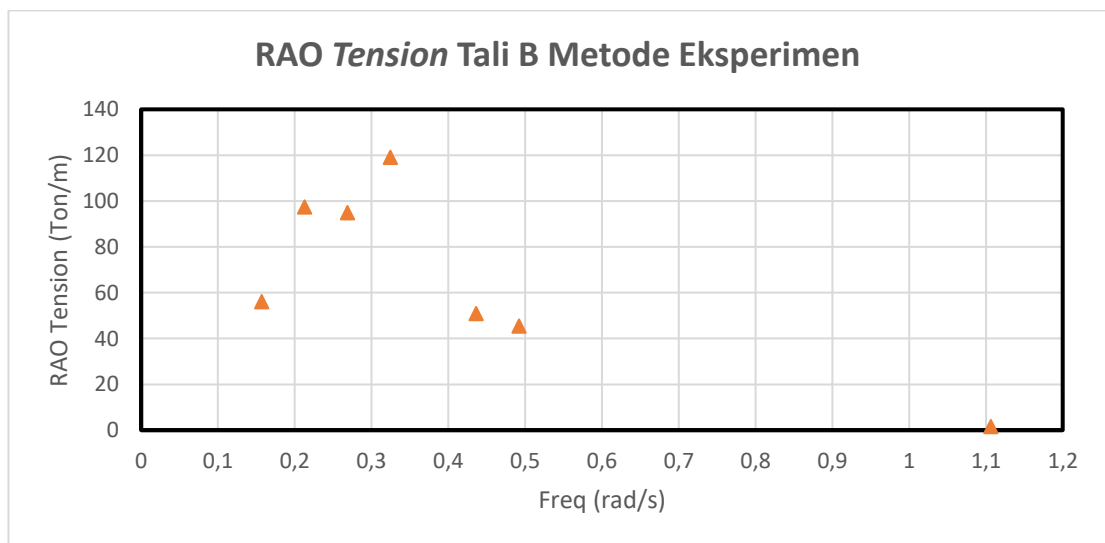
b. *Load Cell 2*

Setiap *time history* pada *tension* tali tambat *load cell 2* dianalisa tinggi respon dan periode respon dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk melihat respon *tension* tali tambat untuk setiap variasi. RAO *tension* tali merupakan perbandingan amplitudo respon *tension* tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.55 menunjukkan RAO *tension* tali dan periode gelombang eksperimen.

Tabel 4.55 RAO *tension* tali *load cell 2* metode eksperimen

No.	Kode	RAO <i>Tension</i> Tali (ton/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	56.061	3.60
2	TT2a	97.435	2.60
3	TT3a	94.988	2.10
4	TT4a	119.091	1.70
5	TT5a	50.909	1.30
6	TT6a	45.455	1.10
7	TT7a	1.683	0.50

Kolom RAO pada tabel 4.55 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari *tension* tali tambat B yang disajikan pada gambar 4.71.



Gambar 4.71 RAO *tension* tali B metode eksperimen

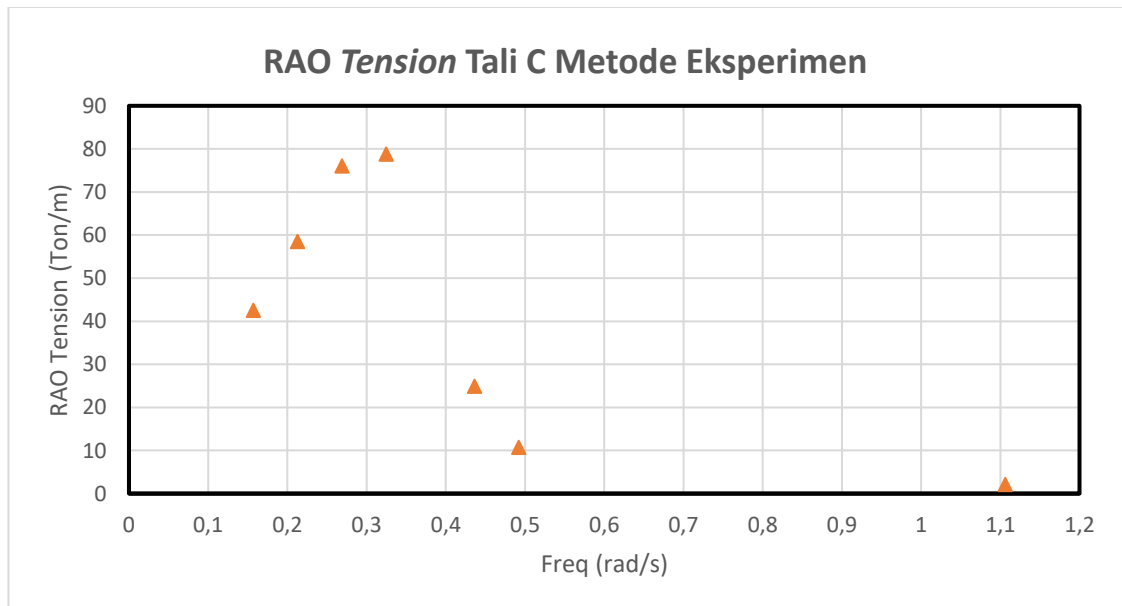
c. *Load Cell 3*

Setiap *time history* pada *tension* tali tambat *load cell 3* dianalisa tinggi respon dan periode respon dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk melihat respon *tension* tali tambat untuk setiap variasi. RAO *tension* tali merupakan perbandingan amplitudo respon *tension* tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.56 menunjukkan RAO *tension* tali dan periode gelombang.

Tabel 4.56 RAO *tension* tali *load cell 3* metode eksperimen

No.	Kode	RAO <i>Tension</i> Tali (ton/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	42.519	3.60
2	TT2a	58.492	2.60
3	TT3a	76.040	2.10
4	TT4a	78.740	1.70
5	TT5a	24.882	1.30
6	TT6a	10.708	1.10
7	TT7a	2.099	0.50

Kolom RAO pada tabel 4.56 dapat di-plot untuk membuat suatu grafik RAO dari *tension* tali tambat C yang disajikan pada gambar 4.72.



Gambar 4.72 RAO *tension* tali C metode eksperimen

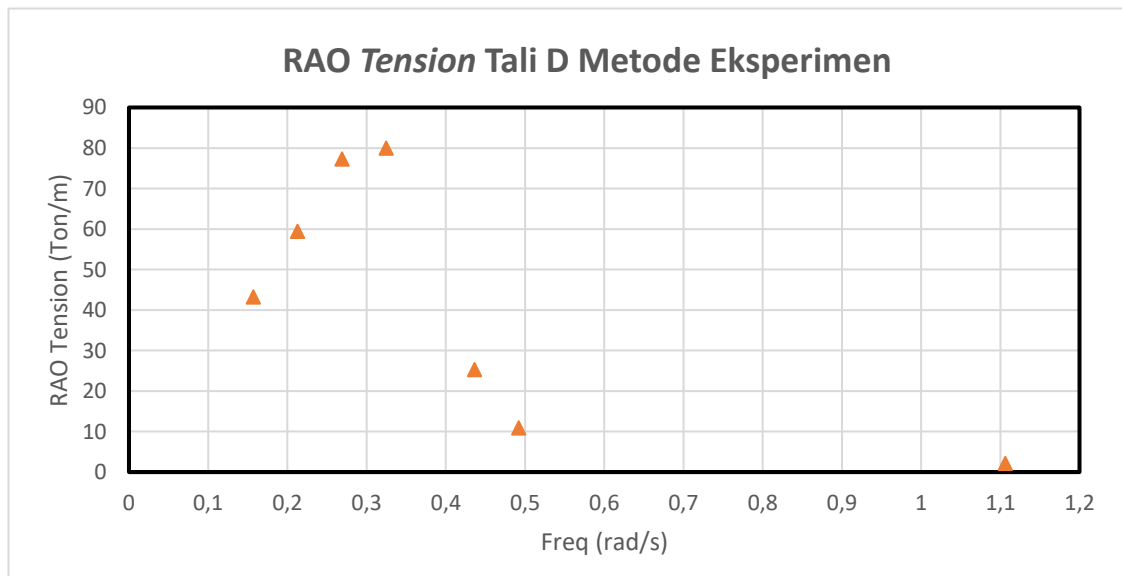
d. *Load Cell 4*

Setiap *time history* pada *tension* tali tambat *load cell 4* dianalisa tinggi respon dan periode respon dengan metode FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk melihat respon *tension* tali tambat untuk setiap variasi. RAO *tension* tali merupakan perbandingan amplitudo respon *tension* tali tambat dengan amplitudo gelombang. Tabel 4.57 menunjukkan RAO *tension* tali dan periode gelombang.

Tabel 4.57 RAO *tension* tali *load cell 4* metode eksperimen

No.	Kode	RAO <i>Tension</i> Tali (ton/m)	Periode Gelombang Eksperimen (s)
1	TT1a	43.20	3.60
2	TT2a	59.428	2.60
3	TT3a	77.257	2.10
4	TT4a	80.001	1.70
5	TT5a	25.280	1.30
6	TT6a	10.880	1.10
7	TT7a	2.133	0.50

Kolom RAO pada tabel 4.57 dapat di-plot untuk membuat suatu grafik RAO dari *tension* tali tambat D yang disajikan pada gambar 4.73.

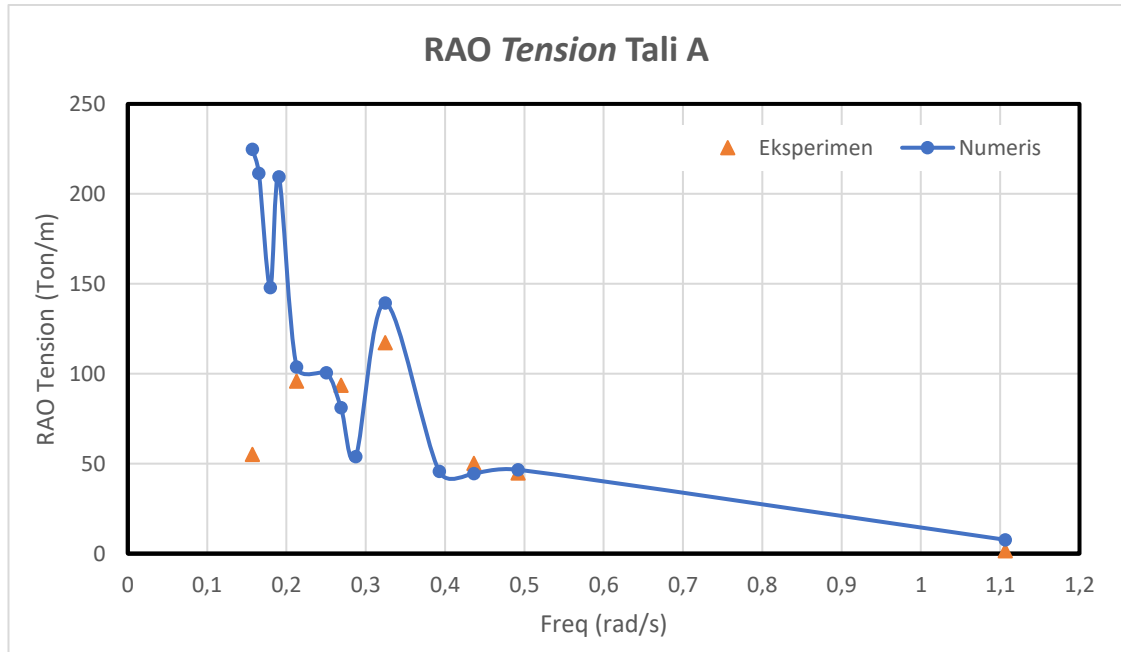


Gambar 4.73 RAO *tension* tali D metode eksperimen

4.7.3. Perbandingan RAO *Tension* Tali Metode Numerik dan Eksperimen

Gambar 4.74 - 4.78 menunjukkan perbandingan RAO tali tambat metode numerik dan eksperimen dari setiap tali tambat dengan arah datang gelombang 0 derajat.

a. Tali Tambat A



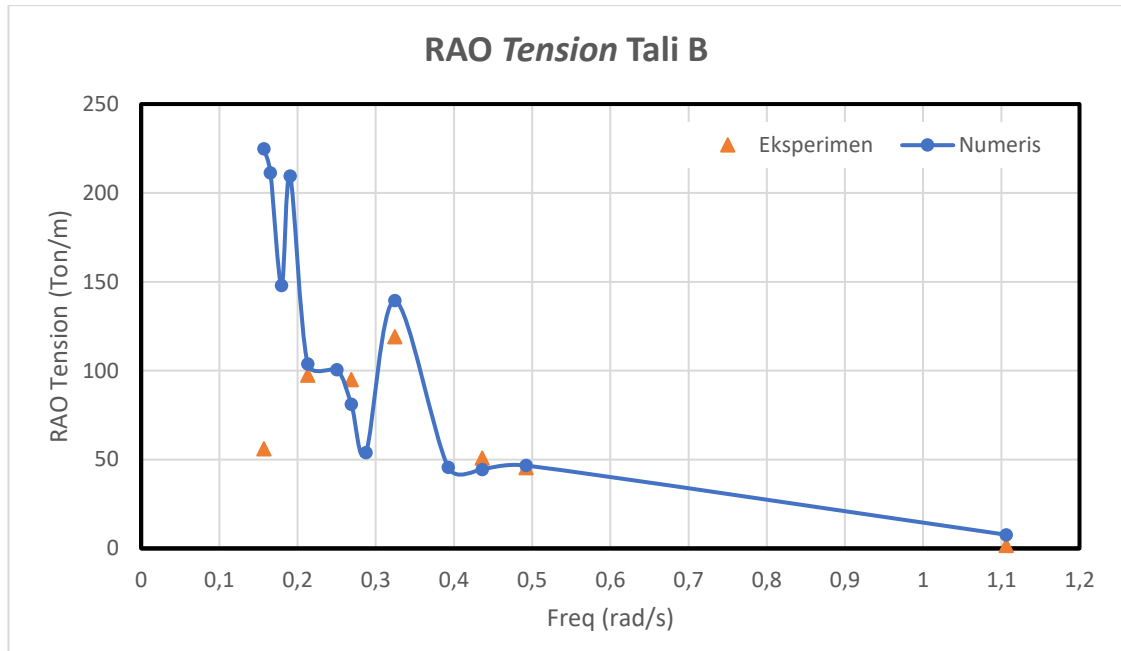
Gambar 4.74 Perbandingan RAO *tension* tali A metode numerik dan eksperimen

RAO *Tension* tali maksimum pada tali tambat A dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada tabel 4.58. Analisa metode numerik menghasilkan RAO *tension* tali yang lebih besar, yakni 224.811 ton/m daripada RAO *tension* tali eksperimen sebesar 117.313 ton/m . Namun, keduanya berada di frekuensi yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.157 rad/s dan metode eksperimen pada frekuensi 0.3245 rad/s. Perbedaan titik frekuensi dikarenakan pada metode eksperimen frekuensi 0,157 rad/s atau periode eksperimen 3.6 detik, keterbatasan durasi pengujian mengakibatkan hasil yang diperoleh tidak optimal.

Tabel 4.58 Perbandingan RAO *tension* tali A metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numerik	0.1571	224.811
Eksperimen	0.3245	117.313

b. Tali Tambat B



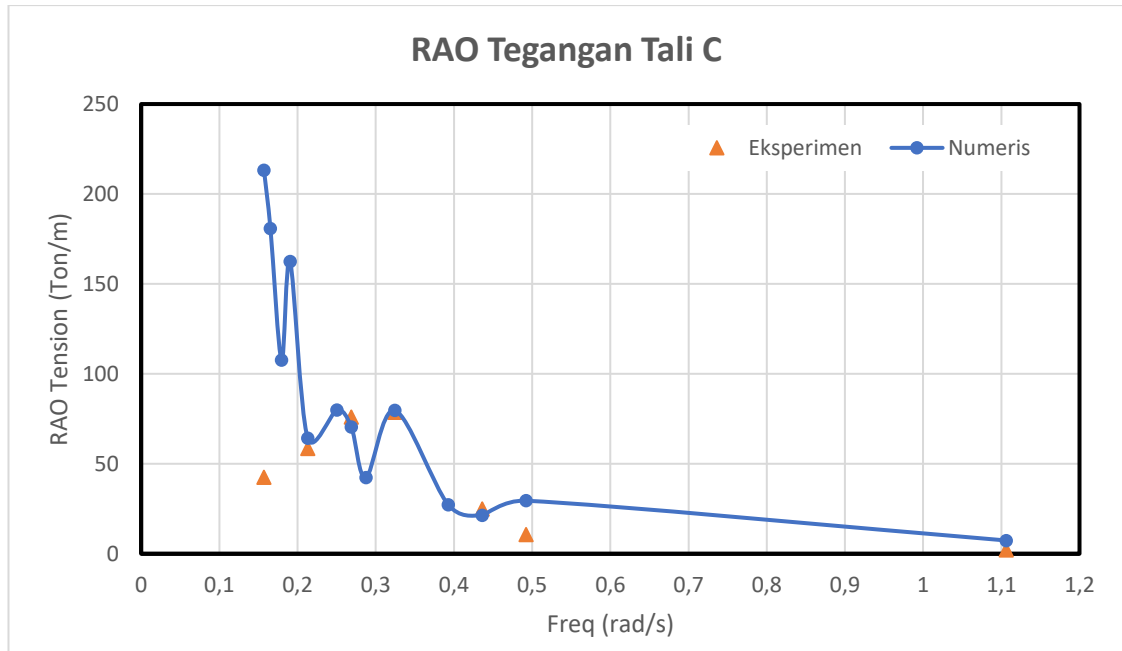
Gambar 4.75 Perbandingan RAO *tension* tali B metode numerik dan eksperimen

RAO *Tension* tali maksimum pada tali tambat B dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada tabel 4.59. Analisa metode numerik menghasilkan RAO *tension* tali yang lebih besar, yakni 224.811 ton/m daripada RAO *tension* tali eksperimen sebesar 119.090 ton/m. Namun, keduanya berada di frekuensi yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.157 rad/s dan metode eksperimen pada frekuensi 0.3245 rad/s. Perbedaan titik frekuensi dikarenakan pada metode eksperimen frekuensi 0,157 rad/s atau periode eksperimen 3.6 detik, keterbatasan durasi pengujian mengakibatkan hasil yang diperoleh tidak optimal.

Tabel 4.59 Perbandingan RAO *tension* tali B metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numerik	0.1571	224.811
Eksperimen	0.3245	119.090

c. Tali Tambat C



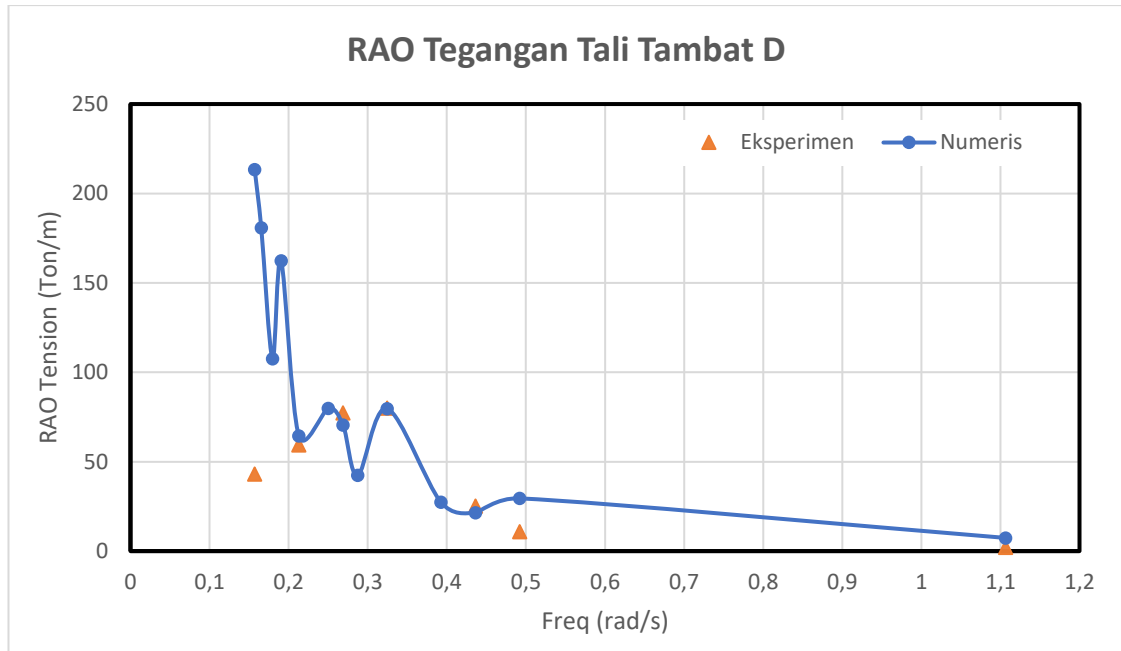
Gambar 4.76 Perbandingan RAO *tension* tali C metode numerik dan eksperimen

RAO *Tension* tali maksimum pada tali tambat C dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada tabel 4.60. Analisa metode numerik menghasilkan RAO *tension* tali yang lebih besar, yakni 213.299 ton/m daripada RAO *tension* tali eksperimen sebesar 78.740 ton/m. Namun, keduanya berada di frekuensi yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.157 rad/s dan metode eksperimen pada frekuensi 0.3245 rad/s. Perbedaan titik frekuensi dikarenakan pada metode eksperimen frekuensi 0,157 rad/s atau periode eksperimen 3.6 detik, keterbatasan durasi pengujian mengakibatkan hasil yang diperoleh tidak optimal.

Tabel 4.60 Perbandingan RAO *tension* tali C metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numerik	0.1571	213.299
Eksperimen	0.3245	78.740

D. Tali Tambat D



Gambar 4.77 Perbandingan RAO *tension* tali D metode numerik dan eksperimen

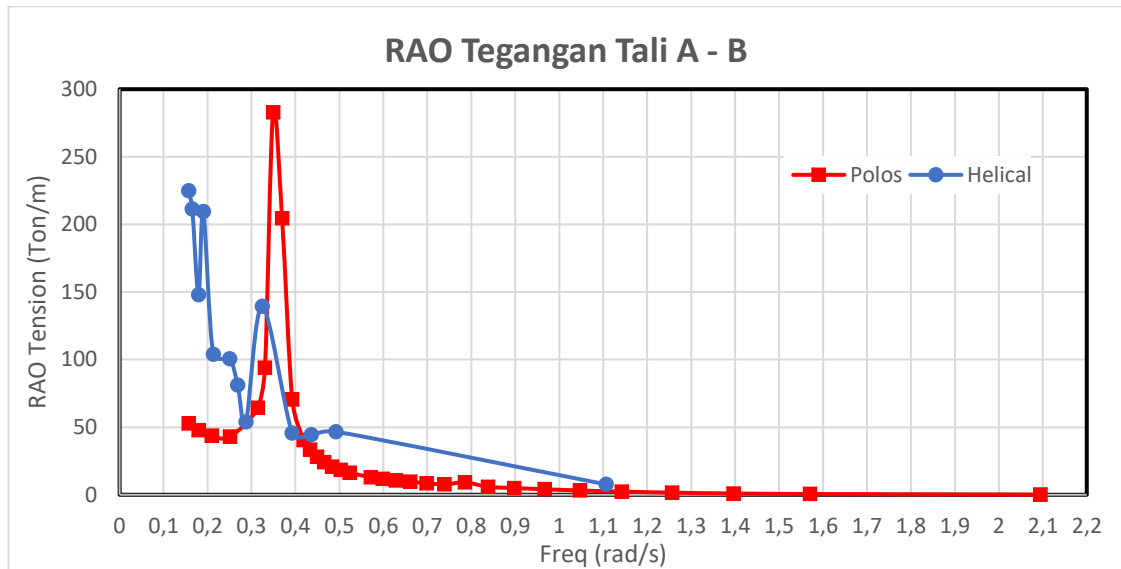
RAO *Tension* tali maksimum pada tali tambat D dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada tabel 4.61. Analisa metode numerik menghasilkan RAO *tension* tali yang lebih besar, yakni 213.299 ton/m daripada RAO *tension* tali eksperimen sebesar 80.001 ton/m. Namun, keduanya berada di frekuensi yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.157 rad/s dan metode eksperimen pada frekuensi 0.3245 rad/s. Perbedaan titik frekuensi dikarenakan pada metode eksperimen frekuensi 0,157 rad/s atau periode eksperimen 3.6 detik, keterbatasan durasi pengujian mengakibatkan hasil yang diperoleh tidak optimal.

Tabel 4.61 Perbandingan RAO *tension* tali D metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numerik	0.1571	213.299
Eksperimen	0.3245	80.001

4.7.4. Perbandingan RAO *Tension* Tali SPAR *Helical Strakes* dan Tanpa *Helical Strakes*

Gambar 4.78 dan 4.79 menunjukkan perbandingan RAO *tension* tali SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode numerik.

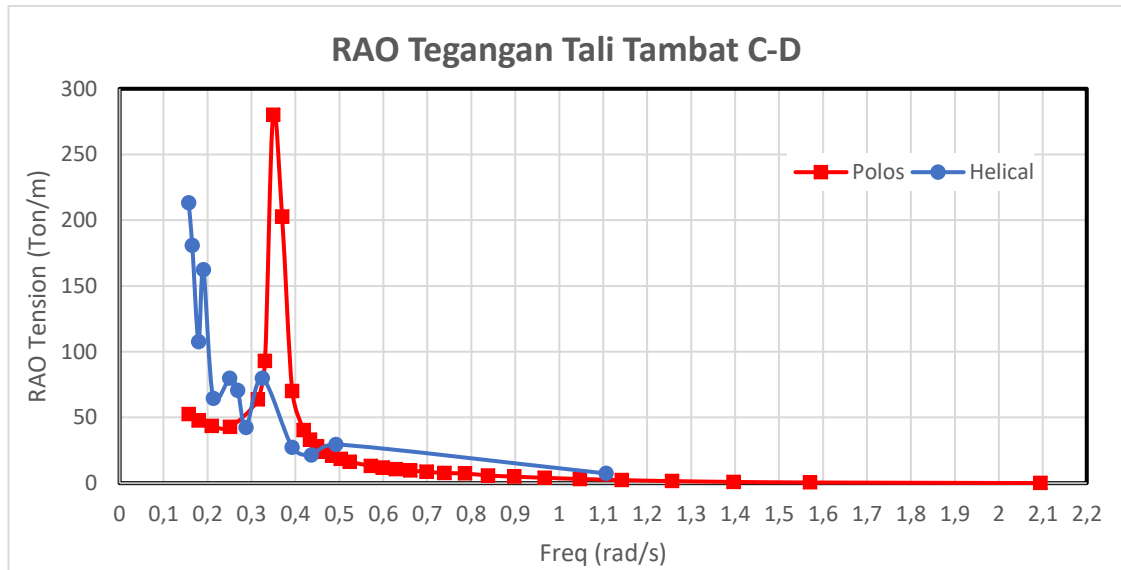


Gambar 4.78 RAO *tension* tali A-B SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

Tabel 4.62 menunjukkan perbandingan RAO *tension* tali tambat A-B dari setiap struktur SPAR yang dianalisa. Hasil analisa menunjukkan SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* memiliki posisi frekuensi natural yang berbeda, yakni 0.157 rad/s pada SPAR *Helical Strakes* dan 0.3491 rad/s pada SPAR tanpa *helical strakes*. RAO terbesar yang terjadi pada SPAR *helical strakes* sebesar 224.811 ton/m dan tanpa *helical strakes* sebesar 282.87 ton/m.

Tabel 4.62 Perbandingan RAO *tension* tali A-B SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.1571	224.811
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.3491	282.87



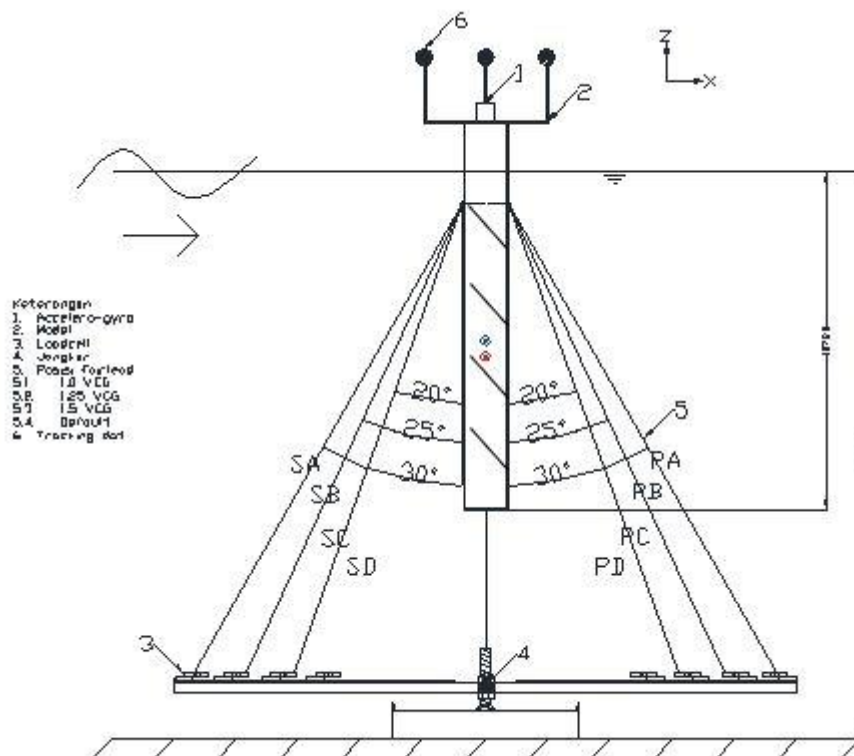
Tabel 4.63 menunjukkan perbandingan RAO *tension* tali tambat C-D dari setiap struktur SPAR yang dianalisa. Hasil analisa menunjukkan SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* memiliki posisi frekuensi natural yang berbeda, yakni 0.157 rad/s pada SPAR *Helical Strakes* dan 0.3491 rad/s pada SPAR tanpa *helical strakes*. RAO terbesar yang terjadi pada SPAR *helical strakes* sebesar 213.299 ton/m dan tanpa *helical strakes* sebesar 280.17 ton/m.

Tabel 4.63 Perbandingan RAO *tension* tali C-D SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.1571	213.299
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.3491	280.17

4.8. VARIASI SUDUT *MOORING LINE*

Pada Tugas Akhir kali ini dilakukan variasi parameterik berupa sudut *mooring line* (30° , 25° dan 20°) pada satu ketinggian *fairlead* seperti pada gambar 4.79. Perhitungan pada variasi sudut *mooring line* menggunakan metode numerik dan metode eksperimen untuk 1 variasi sudut *mooring line* (25°). Metode numerik menggunakan *software* ANSYS AQWA. Hasil *output* perhitungan variasi sudut *mooring line* berupa RAO gerak surge, heave, dan pitch, serta RAO *tension* tali setiap kondisi variasi sudut *mooring line*.



Gambar 4.79 Variasi sudut *mooring line*

4.8.1. RAO Gerak Variasi Sudut *Mooring Line* Metode Numerik

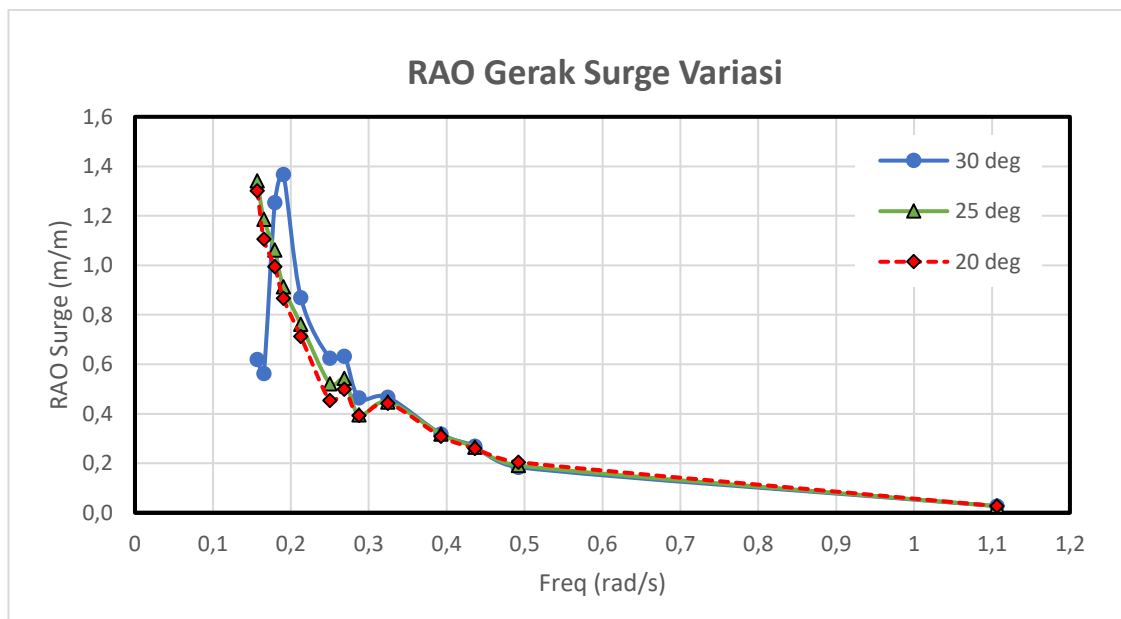
a. Mode Gerak Surge

Pada gerak surge, sudut *mooring line* mempengaruhi respon gerak SPAR, dengan rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.64. Gerak surge terbesar untuk sudut *mooring line* 30° sebesar 4.272 m/m pada frekuensi 0.190 rad/s, sudut *mooring line* 25° sebesar 1.341 m/m pada frekuensi 0.157 rad/s, dan sudut *mooring line* 20° sebesar 1.301 m/m pada frekuensi 0.157 rad/s. Hasil RAO surge variasi sudut *mooring line* dapat dilihat pada

gambar 4.80. Terlihat adanya pergeseran puncak resonansi dikarenakan kenaikan nilai kekakuan akibat pendeknya *mooring line*.

Tabel 4.64 Perbandingan RAO gerak surge variasi

Sudut <i>Mooring Line</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
30°	0.190	4.272
25°	0.157	1.341
20°	0.157	1.301



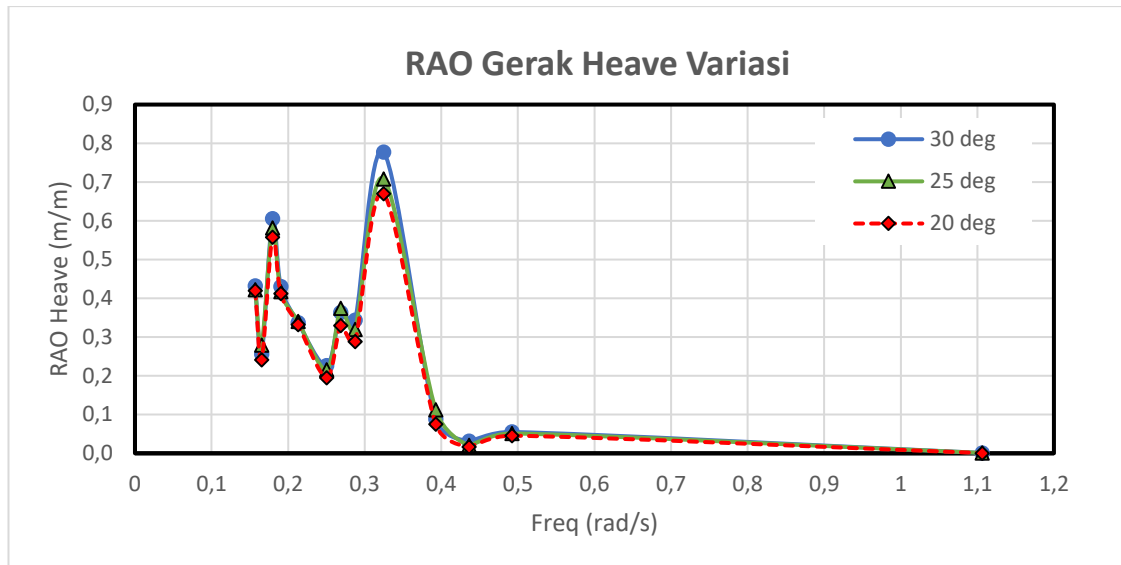
Gambar 4.80 Grafik RAO surge tertambat variasi sudut *mooring line*

b. Mode Gerak Heave

Pada mode gerak heave, sudut *mooring line* mempengaruhi gerak respon SPAR, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.65. Gerak heave terbesar sebesar 0.778 m/m pada frekuensi 0.16 rad/s untuk sudut *mooring line* 30°, sebesar 0.709 m/m pada frekuensi 0.324 rad/s untuk sudut *mooring line* 25°, dan sebesar 0.670 m/m pada frekuensi 0.324 rad/s untuk sudut *mooring line* 20°. Hasil RAO heave variasi sudut *mooring line* dapat dilihat pada gambar 4.81.

Tabel 4.65 RAO heave tertambat variasi sudut *mooring line*

Sudut <i>Mooring Line</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
30°	0.3245	0.778
25°	0.3245	0.709
20°	0.3245	0.670



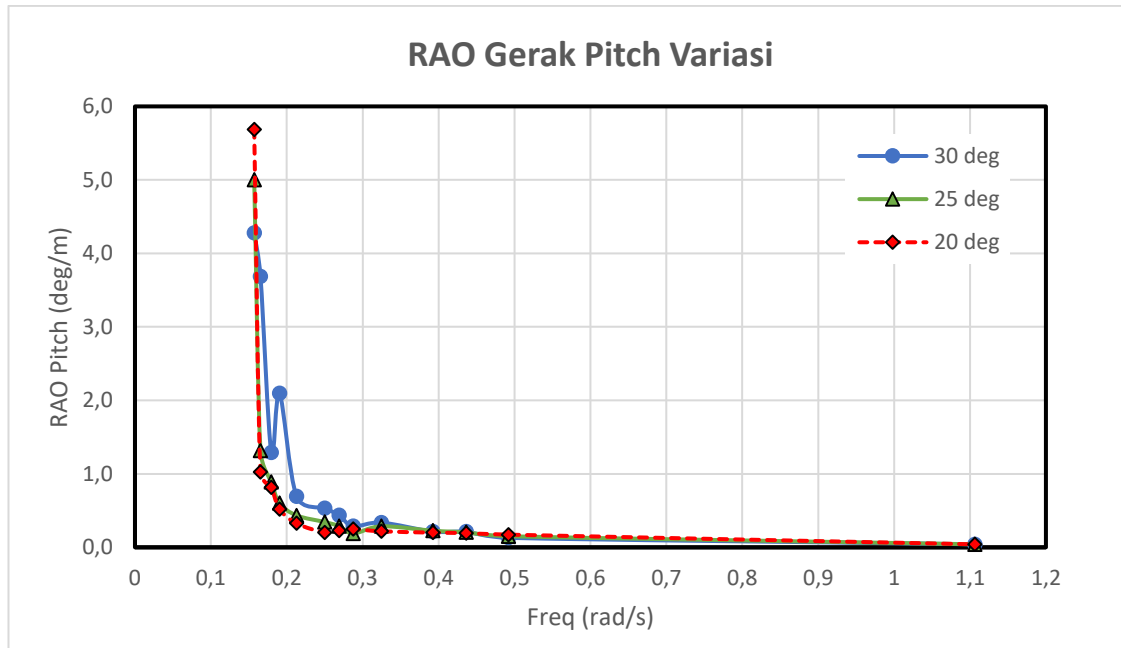
Gambar 4.81 Grafik RAO heave tertambat variasi sudut *mooring line*

c. Mode Gerak Pitch

Pada gerak pitch, gerak respon SPAR juga terpengaruh akibat perubahan sudut *mooring line*, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.66. Gerak pitch terbesar terjadi pada sudut *mooring line* 20° sebesar 5.684 θ/m pada frekuensi 0.157 rad/s, dibandingkan untuk sudut *mooring line* 30° sebesar 4.276 θ/m pada frekuensi 0.157 rad/s, dan sudut *mooring line* 25° sebesar 5.003 θ/m pada frekuensi 0.157 rad/s dan. Hasil RAO pitch variasi sudut *mooring line* dapat dilihat pada gambar 4.82

Tabel 4.66 RAO pitch tertambat variasi sudut *mooring line*

Sudut <i>Mooring Line</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (θ/m)
30°	0.157	4.276
25°	0.157	5.003
20°	0.157	5.684



Gambar 4.82 Grafik RAO pitch tertambat variasi sudut *mooring line*

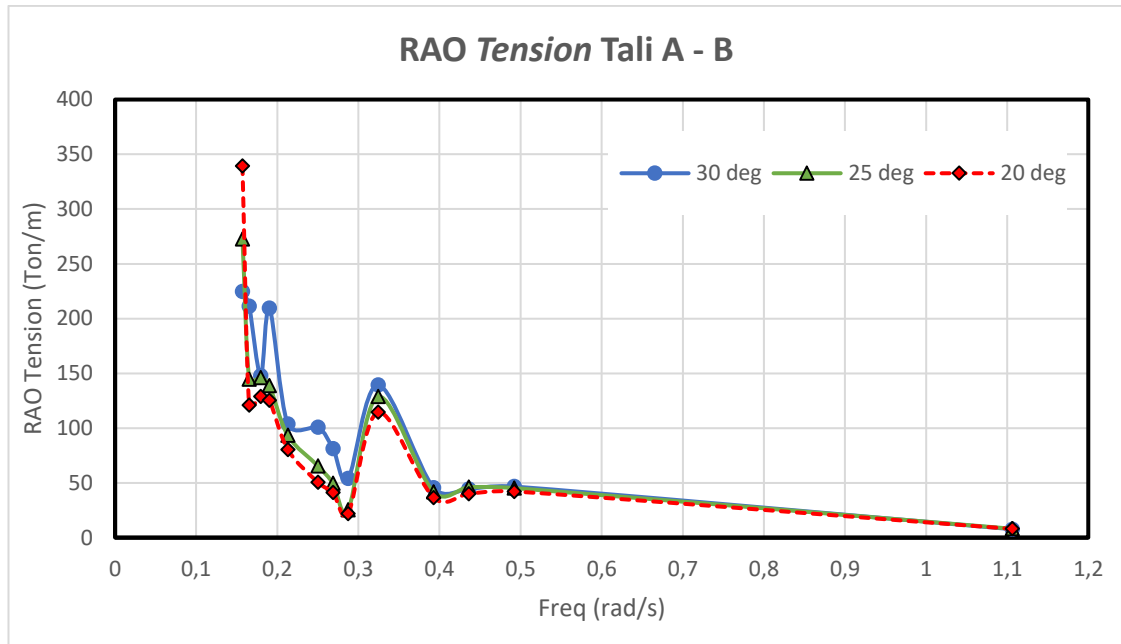
4.8.2. *Tension Tali Variasi Sudut Mooring Line Metode Numerik*

a. Tali tambat A - B

Sama seperti RAO gerak juga terjadi perbedaan RAO *tension* di setiap *mooring line* akibat variasi sudut *mooring line*. *Tension mooring line* A - B mengalami kenaikan *tension mooring line* seiring mengecilnya sudut *mooring line*. RAO *tension* yang terjadi pada *mooring line* A - B dapat dilihat pada Tabel 4.67. RAO *tension* terbesar terjadi pada saat sudut *mooring line* 20° sebesar 339.193 ton/m pada frekuensi 0.157 rad/s. Pada Gambar 4.83 terlihat peningkatan RAO *tension* akibat kekakuan yang meningkat.

Tabel 4.67 RAO *tension* tali A-B variasi sudut *mooring line*

Sudut <i>Mooring Line</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO <i>Tension</i> (ton/m)
30°	0.157	224.811
25°	0.157	272.584
20°	0.157	339.193



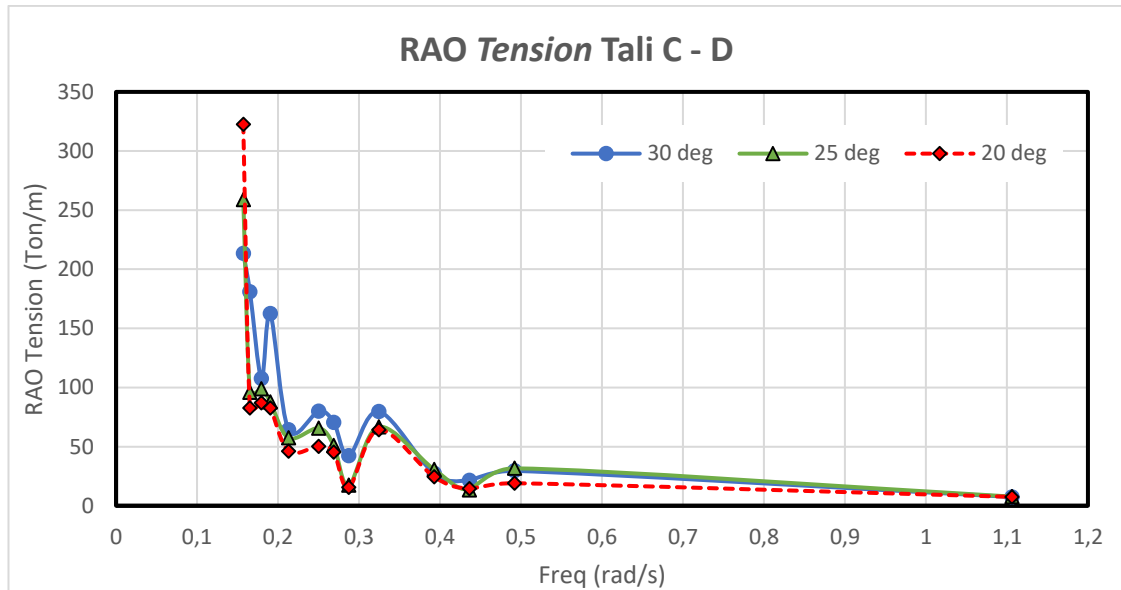
Gambar 4.83 Grafik RAO *tension* line A-B variasi sudut *mooring line*

b. Tali tambat C - D

Sama seperti RAO gerak juga terjadi perbedaan RAO *tension* di setiap *mooring line* akibat variasi sudut *mooring line*. *Tension mooring line* C - D mengalami kenaikan *mooring tension* seiring mengecilnya sudut *mooring line*. RAO *tension* yang terjadi pada *mooring line* C - D dapat dilihat pada Tabel 4.68. RAO *tension* terbesar terjadi pada saat sudut *mooring line* 20° sebesar 322.427 ton/m pada frekuensi 0.157 rad/s. Pada Gambar 4.84 terlihat peningkatan RAO *tension* akibat kekakuan yang meningkat.

Tabel 4.68 RAO *tension* tali C-D variasi sudut *mooring line*

Sudut <i>Mooring Line</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO <i>Tension</i> (ton/m)
30°	0.1571	213.299
25°	0.1571	258.799
20°	0.1571	322.427

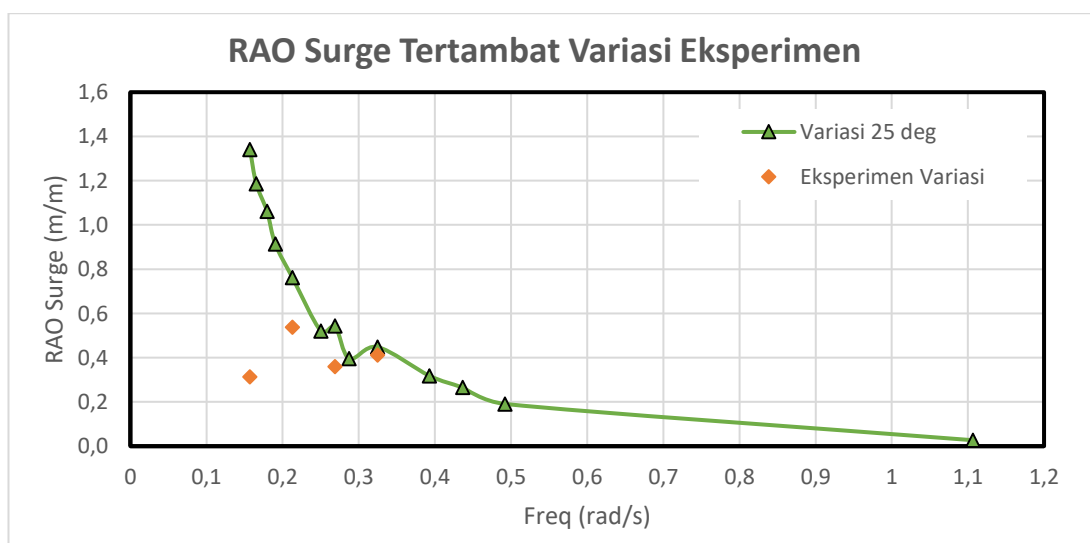


Gambar 4.84 Grafik RAO *tension* line C-D variasi sudut *mooring line*

4.8.3. RAO Gerak Variasi Sudut *Mooring Line* Metode Eksperimen

Gambar 4.85, 4.86, 4.87, dan 4.88 menunjukkan perbandingan RAO tertambat pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode numerik dan eksperimen untuk tiap gerakan surge, heave, dan pitch yang terjadi. Analisa RAO tertambat variasi metode eksperimen yang dilakukan hanya pada variasi sudut *mooring line* 25° dengan 4 periode gelombang eksperimen.

a. Mode Gerak Surge



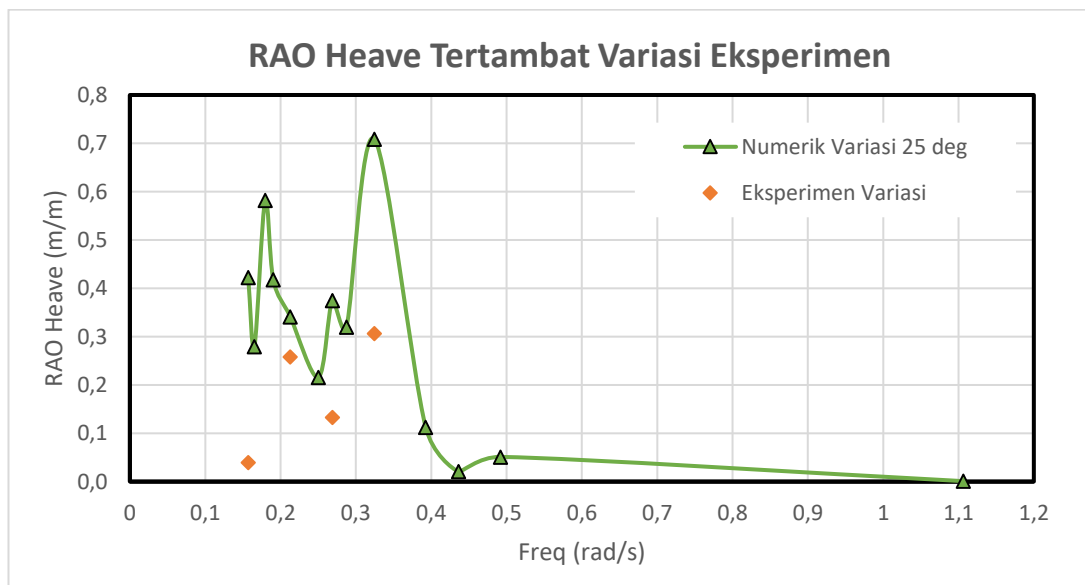
Gambar 4.85 Perbandingan RAO surge variasi metode numerik dan eksperimen

Tabel 4.69 menunjukkan perbandingan RAO surge tertambat dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Analisa metode numerik dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.157 rad/s dengan RAO terbesar 1.341 m/m. Metode eksperimen pada frekuensi 0.2129 rad/s dengan RAO terbesar 0.538 m/m.

Tabel 4.69 Perbandingan RAO surge tertambat metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.1571	1.341
Eksperimen	0.2129	0.538

b. Mode Gerak Heave



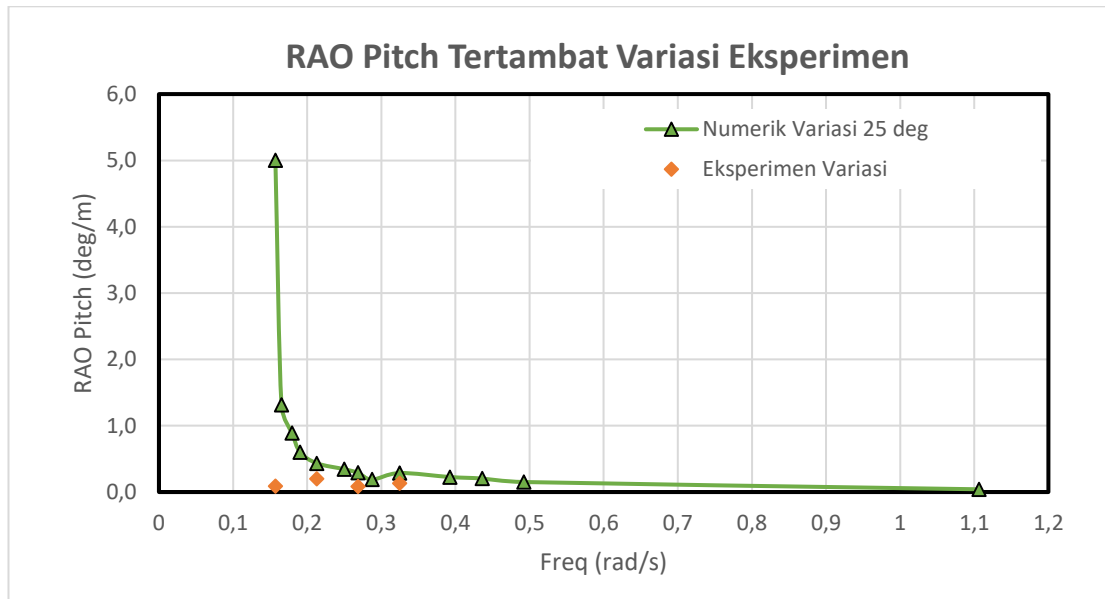
Gambar 4.86 Perbandingan RAO heave tertambat metode numerik dan eksperimen

Tabel 4.70 menunjukkan perbandingan RAO surge tertambat dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Analisa metode numerik dan metode eksperimen memiliki posisi frekuensi natural yang sama, yakni 0.3245 rad/s. RAO terbesar yang terjadi pada analisa numerik sebesar 0.709 m/m dan pada perhitungan eksperimen sebesar 0.306 m/m.

Tabel 4.70 Perbandingan RAO heave tertambat metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.3245	0.709
Eksperimen	0.3245	0.306

c. Mode Gerak Pitch



Gambar 4.87 Perbandingan RAO pitch tertambat metode numerik dan eksperimen

Tabel 4.71 menunjukkan perbandingan RAO surge tertambat dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Akibat hasil eksperimen yang tidak optimal analisa metode numerik dan metode eksperimen menunjukkan posisi frekuensi natural yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.157 rad/s dengan RAO terbesar 4.276 m/m. Metode eksperimen pada frekuensi 0.212 rad/s dengan RAO terbesar 0.281 m/m.

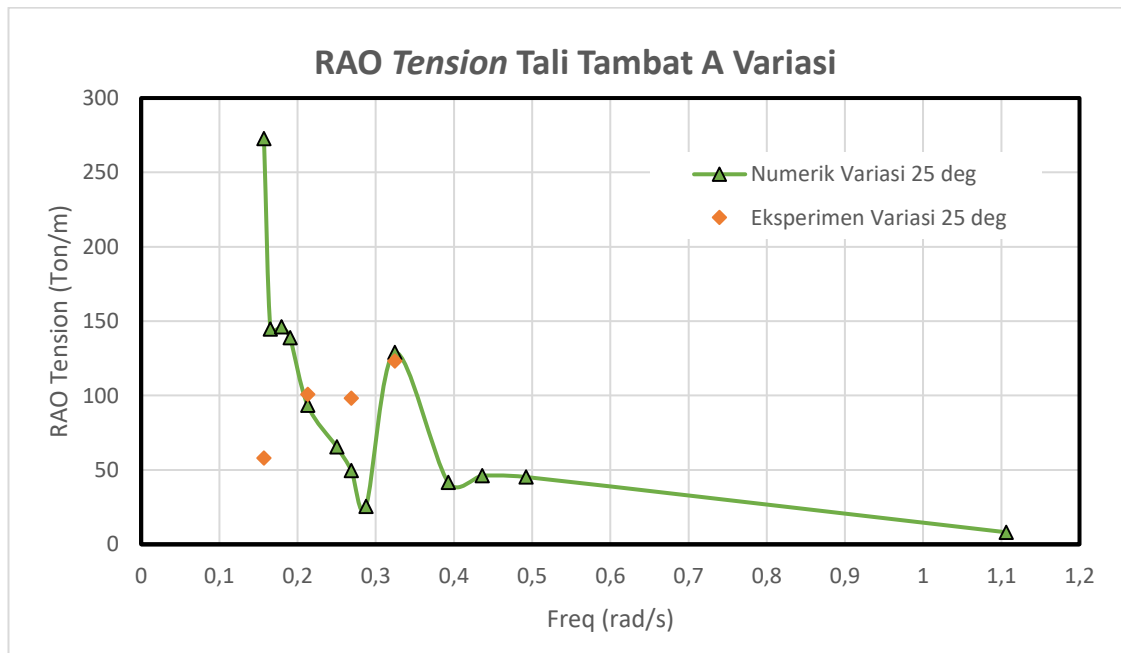
Tabel 4.71 Perbandingan RAO pitch tertambat metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numerik	0.157	5.003
Eksperimen	0.212	0.198

4.8.4. *Tension Tali Variasi Sudut Mooring Line Metode Eksperimen*

Gambar 4.87-4.90 menunjukkan perbandingan RAO tali tambat metode numerik dan eksperimen dari setiap tali tambat dengan arah datang gelombang 0 derajat. Sama seperti pada analisa RAO gerak variasi metode eksperimen, analisa *tension* tali variasi metode eksperimen juga hanya dilakukan pada variasi sudut *mooring line* 25° dengan 4 periode gelombang eksperimen.

a. Tali Tambat A



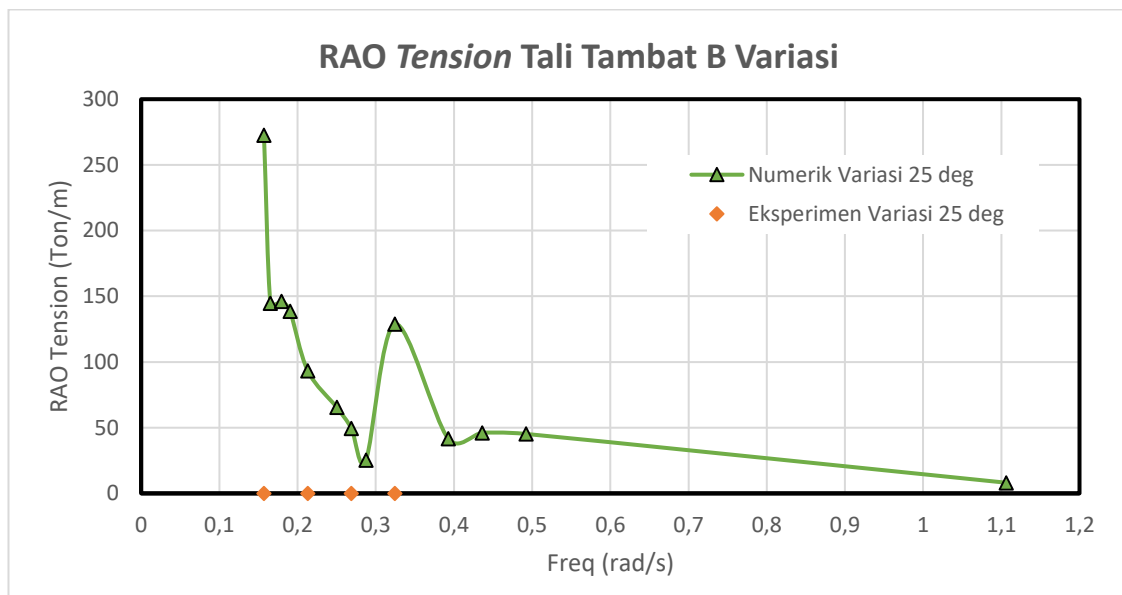
Gambar 4.88 Perbandingan RAO *tension* tali A variasi metode numerik dan eksperimen

RAO *Tension* tali maksimum variasi sudut *mooring line* 25° pada tali tambat A dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada tabel 4.72. Analisa metode numerik menghasilkan RAO *tension* tali yang lebih besar, yakni 272.584 ton/m daripada RAO *tension* tali eksperimen sebesar 123.179 ton/m. Namun, keduanya berada di frekuensi yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.157 rad/s dan metode eksperimen pada frekuensi 0.3245 rad/s. Perbedaan titik frekuensi dikarenakan pada metode eksperimen frekuensi 0,157 rad/s atau periode eksperimen 3.6 detik, keterbatasan durasi pengujian mengakibatkan hasil yang diperoleh tidak optimal.

Tabel 4.72 Perbandingan RAO *tension* tali A variasi metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numerik	0.1571	272.584
Eksperimen	0.3245	123.179

b. Tali Tambat B



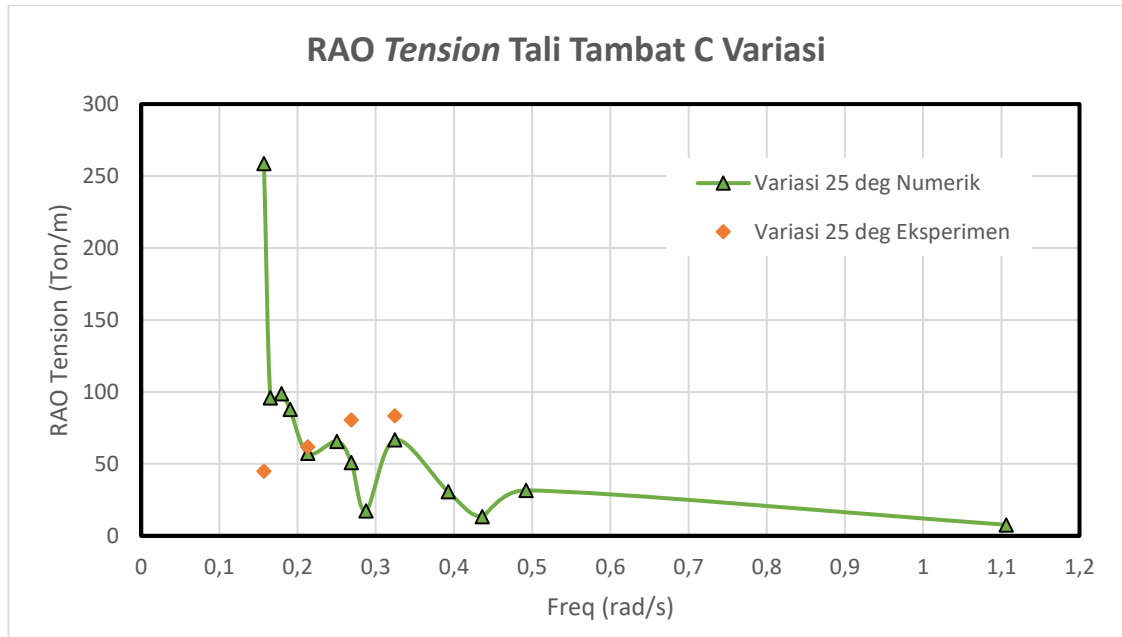
Gambar 4.89 Perbandingan RAO *tension* tali B variasi metode numerik dan eksperimen

RAO *Tension* tali maksimum variasi sudut *mooring line* 25° pada tali tambat B dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada tabel 4.73. Pada tali tambat B, *load cell* mengalami kerusakan sehingga tidak ada data yang dapat dianalisa. Metode numerik menghasilkan RAO *tension* tali terbesar pada frekuensi 0.157 rad/s sebesar 272.584 ton/m.

Tabel 4.73 Perbandingan RAO *tension* tali B variasi metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numerik	0.1571	272.584
Eksperimen	0.3245	119.090

c. Tali Tambat C



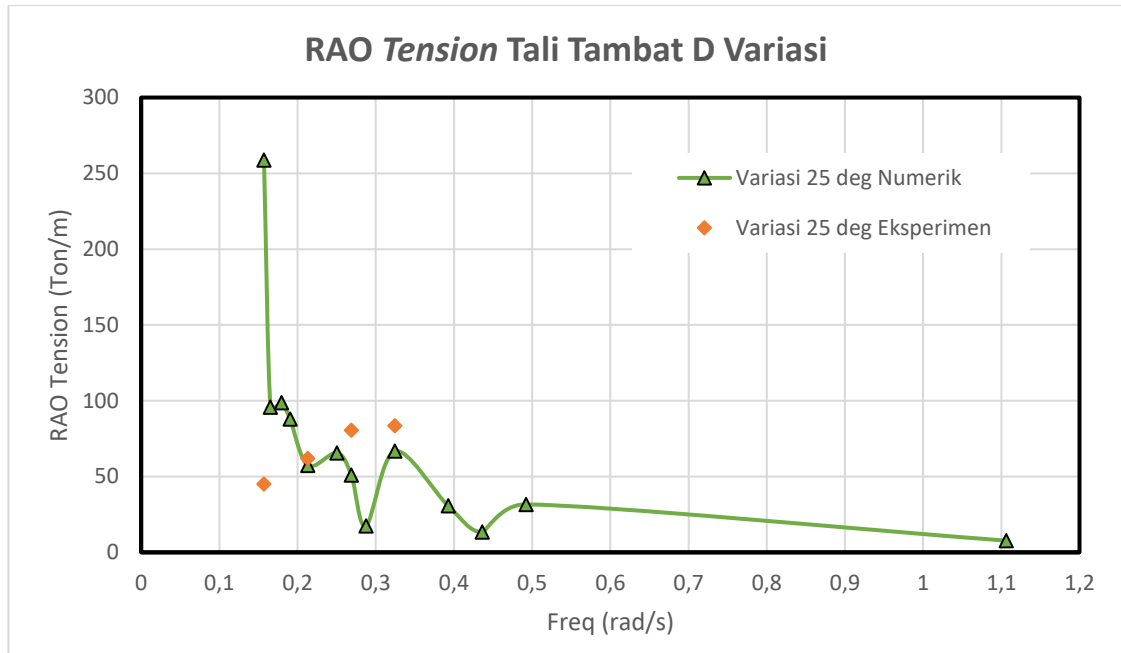
Gambar 4.90 Perbandingan RAO *tension* tali C variasi metode numerik dan eksperimen

RAO *Tension* tali maksimum variasi sudut *mooring line* 25° pada tali tambat C dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada tabel 4.74. Analisa metode numerik menghasilkan RAO *tension* tali yang lebih besar, yakni 258.799 ton/m daripada RAO *tension* tali eksperimen sebesar 83.464 ton/m. Namun, keduanya berada di frekuensi yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.157 rad/s dan metode eksperimen pada frekuensi 0.3245 rad/s. Perbedaan titik frekuensi dikarenakan pada metode eksperimen frekuensi 0,157 rad/s atau periode eksperimen 3.6 detik, keterbatasan durasi pengujian mengakibatkan hasil yang diperoleh tidak optimal.

Tabel 4.74 Perbandingan RAO *tension* tali C variasi metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numerik	0.1571	258.799
Eksperimen	0.3245	83.464

d. Tali Tambat D



Gambar 4.91 Perbandingan RAO *tension* tali D variasi metode numerik dan eksperimen

RAO *Tension* tali maksimum variasi sudut *mooring line* 25° pada tali tambat C dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada tabel 4.75. Analisa metode numerik menghasilkan RAO *tension* tali yang lebih besar, yakni 258.799 ton/m daripada RAO *tension* tali eksperimen sebesar 78.740 ton/m. Namun, keduanya berada di frekuensi yang berbeda, dimana untuk metode numerik pada frekuensi 0.157 rad/s dan metode eksperimen pada frekuensi 0.3245 rad/s. Perbedaan titik frekuensi dikarenakan pada metode eksperimen frekuensi 0,157 rad/s atau periode eksperimen 3.6 detik, keterbatasan durasi pengujian mengakibatkan hasil yang diperoleh tidak optimal.

Tabel 4.75 Perbandingan RAO *tension* tali D variasi metode numerik dan eksperimen

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numerik	0.1571	258.799
Eksperimen	0.3245	78.740

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan yang telah dilakukan pada BAB IV, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan yang menjawab permasalahan yang ada pada penelitian Tugas Akhir ini. Berikut adalah kesimpulannya:

1. Hasil RAO *free floating* metode numerik dan eksperimen menunjukkan, kedua metode memiliki frekuensi natural yang sama untuk setiap gerakan (surge, heave, pitch). RAO terbesar gerakan surge terjadi pada frekuensi 0.1571 rad/s metode numerik sebesar 1.2742 m/m. RAO terbesar gerakan heave terjadi pada frekuensi 0.2688 rad/s metode numerik sebesar 10.4024 m/m. RAO terbesar gerakan pitch terjadi pada frekuensi 0.4363 rad/s metode numerik sebesar 0.2598 deg/m. Penambahan *Helical Strakes* pada SPAR mengakibatkan SPAR dengan *Helical Strakes* memiliki respon gerak heave dan pitch yang lebih rendah, dan respon gerak surge yang lebih tinggi daripada SPAR tanpa *Helical Strakes*.
2. Hasil RAO tertambat metode numerik dan eksperimen menunjukkan, perbedaan frekuensi natural kedua metode pada gerak surge dan pitch, sedangkan heave yang memiliki frekuensi natural yang sama. Karakteristik gerak SPAR memiliki besar RAO yang bervariasi pada kondisi tertambat dengan variasi sudut 30°, 25°, dan 20°. RAO terbesar gerakan surge terjadi saat variasi 30° pada frekuensi 0.190 rad/s sebesar 4.272 m/m. RAO terbesar gerakan heave terjadi saat variasi 30° pada frekuensi 0.16 rad/s sebesar 0.778 m/m. RAO terbesar gerakan pitch terjadi saat variasi 20° pada frekuensi 0.157 rad/s sebesar 5.684 θ /m.
3. Hasil RAO *tension* tali tertambat metode numerik dan eksperimen menunjukkan, perbedaan frekuensi RAO *tension* tali terbesar. Karakteristik *tension* setiap tali memiliki besar RAO yang berbeda dengan variasi sudut 30°, 25°, dan 20°. RAO *tension* tali terbesar terjadi saat variasi 20° pada frekuensi 0.157 rad/s dengan nilai 272.58 ton/m untuk tali A-B dan 258.79 ton/m untuk tali C-D.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut yang lebih baik lagi adalah sebagai berikut:

1. Variasi sudut *mooring line* juga perlu dilakukan secara eksperimental dengan perbedaan sudut yang lebih besar.
2. Sebaiknya perlu dilakukan *decay test* untuk mengetahui nilai *damping*.
3. Bentuk struktur SPAR dapat dimodifikasi lebih lanjut seperti penambahan *heave plates* atau floater menjadi multibuoy SPAR.
4. Perlu penambahan instrumen *wave probe* dan sebaiknya menggunakan *image processing* sebagai instrumen pengukur gerak translasi dan rota

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, A. & Jain, A., 2003. Dynamic behavior of offshore spar platforms under regular sea waves. *Ocean Engineering*, pp. 487-516.
- Barltrop, N., 1996. *Floating Structures: a guide for design and analysis Volume One*. Ledbury: Oilfield Publications Limited.
- Chakrabarti, S., 1994. *Offshore Structure Modelling*. Singapore: World Scientific.
- Chakrabarti, S. K., 2005. *Handbook of Offshore Engineering*. Plainfield: Elsevier Ltd.
- Chen, X. B., 2011. Offshore hydrodynamics and applications. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering Vol 4, No. 3*, pp. 124-142.
- Deep Oil Technology Inc., 1995. *SPAR model test Joint Industry Project*, California: Deep Oil Technology Inc. .
- Djarmiko, E. B., 1992. *Hydro-structural studies on swath type vessel*. Glasgow: Glasgow Theses Service.
- Djarmiko, E. B., 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITSpress.
- Faltinsen, O. M., 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: University of Cambridge .
- Islam, A. S., Jameel, M., Jumaat, M. Z. & Salman, F. A., 2012. Review of offshore energy in Malaysia and floating Spar platform for sustainable exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 6268-6284.
- Jaelani, A., 2008. *Kajian Eksperimental Perbandingan Pengaruh Sistem Tambat Taut dan Catenary Terhadap Gerakan SPAR Tipe Klasik Akibat Beban Gelombang*. Surabaya: ITS.
- Kim, M.-H., 2012. *Spar Platform Technology and Analysis Methods*. Virginia: ASCE.
- Kurian, V., Ng, C. & Liew, M., 2012. Dynamic Responses of Truss Spar Due to Wave Actions. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, pp. 11-17.
- Qinwei, D. et al., 2017. Research of Influence Helical Strakes and Its Parameters on Dynamic Response of Platform of Floating Wind Turbine Based on Optimization Method of Orthogonal Design. *Journal of Solar Energy Engineering*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Sarpkaya, T., 1981. *Mechanic of Wave Forces on Offshore Structures*. New York: Van Nostrand Reinhold.

Sinpyo, H. et al., 2013. *Scale Model Experiment of SPAR-Type Floating Offshore Platform*. Alaska, USA, International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), pp. 907 - 912.

Sinpyo, H., Inwon, L., Seong, H. P. & Cheolmin, L., 2015. An Experimental Study of The Effect of Mooring System on The Dynamics of a SPAR Buoy-type Floating Offshore Wind Turbine. *International Journal Naval Architecture Ocean Engineering*, pp. 559 - 579.

Sirnivas, S., Halkyard, J. & Finn, L., 2003. *SPARS - Lesson Learned*, s.l.: Technip Offshore Inc.

Stendal, L. C., 2015. *Analysis Methods for Mooring Systems with focus on Accidental Limit State*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.

Wang, Z., 2012. *An Evolutinary Optimisation Study on Offshore Mooring System Design*. New South Wales: University of Wollongong.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN A

TABULASI DISTRIBUSI

MASSA

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN TABULASI DISTRIBUSI MASSA
(TITIK BERAT DAN GIRASI)

Data Spar		
ID	12.80000256	cm
OD	14.00000256	cm
Draft	108.0076406	cm
Length	123.3676437	cm
Fairlead Depth	10.19124013	cm
Length	40	cm
Width	40	cm
Height	15.65257456	cm
Depth A	731.4287177	cm
Depth B	182.8571794	cm
KG	49.61768611	cm
Pitch Radius	49.17639079	cm
Roll Radius	49.17639079	cm

Model
Pre-initial design

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.49	1	1628.489876
	Ballast 2	2	1623.09	1	1623.089876
	Ballast 3	2.5	2094.09	1	2094.089876
	Ballast 4	1	663.5899	1	663.5898755
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
Blok B	Ballast 1	2.5	2096.69	1	2096.689876
	Ballast 2	0.8	465.9899	1	465.9898755
	Ballast 3	0.5	179.4899	1	179.4898755
Topside		0.3	599.5	1	599.5
Tambahan	Ulir (130 cm)		352.0899	1	352.0898755
	Pipa	-	4087.53	1	4087.529853
	Penyambung	-		1	0
	Helical Stakes				
	Mur	-		2	0
Total					13838.0131

Perhitungan VCG

1. Blok A

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
<i>Ballast 1</i>	2	6.8	1628.49	11073.73115
<i>Ballast 2</i>	2	4.8	1623.09	7790.831403
<i>Ballast 4</i>	1	3.3	2094.09	6910.496589
<i>Ballast 3</i>	2.5	1.6	663.5899	1028.564307
<i>Cap</i>	0.3	0.2	47.46424	7.119635947
Total			6056.724	26810.74309

$$\text{VCG Blok A} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 4.426608 \text{ cm dari keel}$$

3. Tambahan

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa (g)	Momen (g.cm)
Ulir (130 cm)	-	65.3	352.0899	22991.46887
Pipa	-	61.7	4087.53	252200.5919
Helical 1	-	54.0	96.64	5218.54397
Helical 2	-	54.0	96.64	5218.54397
Helical 3	-	54.0	96.64	5218.54397
<i>Topside</i>	0.3	123.55	599.5	74068.225
Total			5329.039	364915.9177

$$\text{VCG tambahan} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 68.47687 \text{ cm dari keel}$$

4. Total

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel (cm)	Massa	Momen
Blok A	-	4.4	6056.724	26810.74309
Blok B	-	110.2	2742.17	302134.8265
Tambahan	-	68.5	5329.039	364915.9177
Total			14127.93	693861.4873

$$\text{VCG total} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 49.11274 \text{ cm dari keel}$$

$$\text{Error} = \frac{\text{Model-Teori} - \text{Teori}}{\text{Teori}} \times 100\%$$

= -1.0% memenuhi

PERHITUNGAN GIRASI

Bagian		LCG (cm)	TCG (cm)	VCG from keel (cm)	Ditinjau dari COG (cm)	Massa (g)	I _{ox} (g.cm)	I _{oy} (g.cm)	y ² +z ²	x ² +z ²	w*(y ² +z ²)	w*(x ² +z ²)	I _x (g.cm)	I _y (g.cm)
Blok A	Ballast 1	0.0	0.0	6.5	-42.6	1628.5	16446.1	16446.1	1815.8	1815.8	2957086.4	2957086.4	2973532.5	2973532.5
	Ballast 2	0.0	0.0	4.5	-44.6	1623.1	16391.5	16391.5	1990.3	1990.3	3230430.5	3230430.5	3246822.0	3246822.0
	Ballast 3	0.0	0.0	3.0	-46.1	2094.1	20624.6	20624.6	2126.4	2126.4	4452841.2	4452841.2	4473465.8	4473465.8
	Ballast 4	0.0	0.0	1.3	-47.9	663.6	6826.0	6826.0	2290.8	2290.8	1520179.6	1520179.6	1527005.6	1527005.6
	Cap	0.0	0.0	0.2	-49.0	47.5	471.3	471.3	2397.4	2397.4	113788.4	113788.4	114259.7	114259.7
Blok B	Ballast 7	0.0	0.0	112.1	62.9	179.5	1756.6	1756.6	3961.1	3961.1	710977.1	710977.1	712733.6	712733.6
	Ballast 6	0.0	0.0	111.4	62.3	466.0	4556.9	4556.9	3879.7	3879.7	1807902.1	1807902.1	1812459.0	1812459.0
	Ballast 5	0.0	0.0	109.8	60.6	2096.7	20748.5	20748.5	3676.9	3676.9	7709270.9	7709270.9	7730019.4	7730019.4
Tambahan	Ulir (130 cm)	0.0	0.0	65.3	16.2	352.1	495874.0	495874.0	262.0	262.0	92257.2	92257.2	588131.2	588131.2
	Pipa	0.0	0.0	61.7	12.6	4087.5	5287070.0	5287070.0	158.4	158.4	647624.4	647624.4	5934694.4	5934694.4
	Helical 1	7.8	0.0	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	83.9	23.9	8112.7	2308.3	109581.9	103777.5
	Helical 2	4.3	6.8	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	41.9	70.3	4053.8	6790.0	105523.1	108259.3
	Helical 3	4.3	6.8	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	41.9	70.3	4053.8	6790.0	105523.1	108259.3
	Topside	0.0	0.0	123.6	74.4	599.5	79937.8	79937.8	5540.9	5540.9	3321772.8	3321772.8	3401710.6	3401710.6
Total													32835461.9	32835129.9

5. Jari Jari Girasi

R_{xx}= 48.2095 cm

R_{yy}= 48.2092 cm

6. Check error

Err R_{xx}= -1.97% memenuhi

Err R_{yy}= -1.97% memenuhi

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B
PENGUKURAN PERIODE GERAK
PENDULUM SPAR

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM SPAR

No	PERIODE			
	Dengan Massa Tambahan		Tanpa Massa Tambahan	
	Periode 10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran	Periode10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran
1	34	3.4	34.5	3.45
2	34.2	3.42	34.2	3.42
3	34.3	3.43	35.1	3.51
4	34.3	3.43	34.2	3.42
5	34.4	3.44	34.6	3.46
6	34.3	3.43	34.4	3.44
7	34.3	3.43	34.2	3.42
8	34.4	3.44	34.7	3.47
9	34.7	3.47	34.5	3.45
10	34.7	3.47	34.7	3.47
11	33.9	3.39	34.5	3.45
12	33.9	3.39	34.5	3.45
13	34.3	3.43	34.3	3.43
14	33.9	3.39	34.7	3.47
15	34	3.4	34.2	3.42
16	34.3	3.43	34.7	3.47
17	34.5	3.45	34.5	3.45
18	34.4	3.44	34.6	3.46
19	34.4	3.44	34.9	3.49
20	34.4	3.44	35	3.5
21	34.5	3.45	35	3.5
22	34.5	3.45	35	3.5
23	34.2	3.42	34.9	3.49
24	34.2	3.42	35	3.5
25	34.4	3.44	34.9	3.49
26	34.5	3.45	34.9	3.49
27	34.4	3.44	34.5	3.45
28	34.4	3.44	34.5	3.45
29	34.5	3.45	34.8	3.48
30	34.5	3.45	35	3.5
31	34.6	3.46	35	3.5
32	34.2	3.42	35.2	3.52
33	34	3.4	34.7	3.47
34	34.1	3.41	34.5	3.45
35	34.4	3.44	34.7	3.47
36	34.3	3.43	34.2	3.42
37	34.5	3.45	35	3.5

No	PERIODE			
	Dengan Massa Tambahan		Tanpa Massa Tambahan	
	Periode 10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran	Periode10 kali Getaran	Periode 1 kali getaran
38	34.5	3.45	35	3.5
39	34.1	3.41	35.2	3.52
40	34.6	3.46	35	3.5
41	34.5	3.45	34.5	3.45
42	34.7	3.47	34.7	3.47
43	34.7	3.47	34.7	3.47
44	34.6	3.46	34.7	3.47
45	34.4	3.44	34.7	3.47
46	34.2	3.42	34.6	3.46
47	34	3.4	34.6	3.46
48	34	3.4	34.5	3.45
49	34.3	3.43	35	3.5
50	34.4	3.44	35	3.5

LAMPIRAN C
OUTPUT ANSYS AQWA

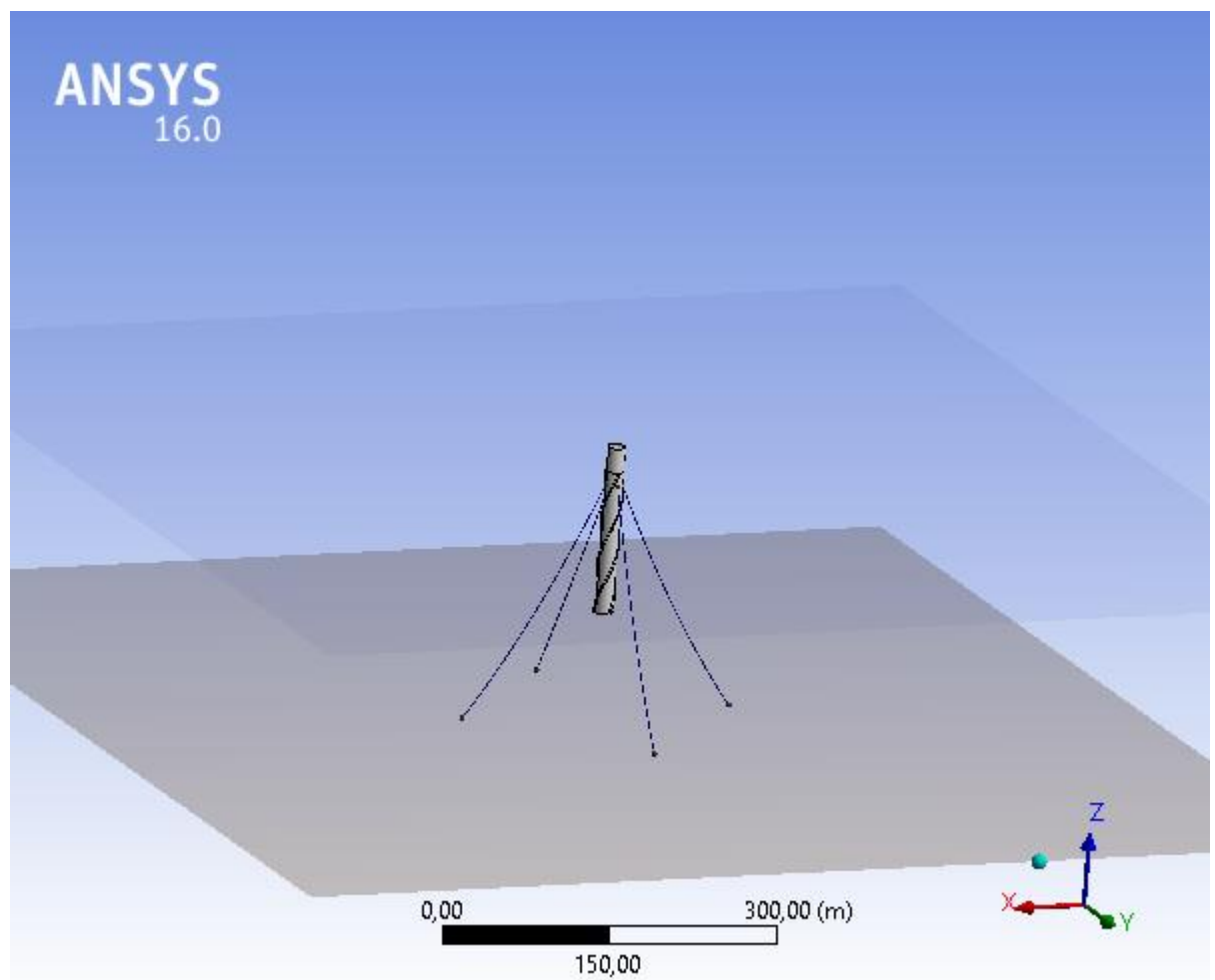
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

NUMERIK ANSYS AQWA



Project

Name	Project
Data Folder Root	D:\KULIAH\TUGAS AKHIR\Nasi goreng\mie goreng_files\dp0\AQW\AQW
Date of Creation	19/04/2018 17:13:29
Last Modified	01/07/2018 13:18:01
Global Control	50
Geometric Features	50
Connections	50
Environment Features	50
Product Version	16.0 RELEASE



Contents

- [Units](#)
- [Model \(A3, B3\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Part 3](#)
 - [Surface Body](#)
 - [Surface Body](#)
 - [Part 3 Axes](#)
 - [Surface Body](#)
 - [Surface Body](#)
 - [Surface Body](#)
 - [Point Mass](#)
 - [Connection Point 5](#)
 - [Connection Point 6](#)
 - [Connection Point 7](#)
 - [Connection Point 8](#)
 - [Fixed Point 1](#)
 - [Fixed Point 2](#)
 - [Fixed Point 3](#)
 - [Fixed Point 4](#)
 - [Connections](#)
 - [Catenary Data](#)
 - [Catenary Section 1](#)
 - [Cable 6](#)
 - [Cable 7](#)
 - [Cable 8](#)
 - [Cable 10](#)
 - [Mesh](#)
 - [Mesh Sizing](#)
 - [Hydrodynamic Diffraction \(A4\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Gravity](#)
 - [Structure Selection](#)
 - [Wave Directions](#)
 - [Wave Frequencies](#)
 - [Solution \(A5\)](#)
 - [Hydrostatic](#)
 - [RAOs \(Response Amplitude Operators\) \(Distance/Rotation vs Frequency\)](#)
 - [RAOs \(Response Amplitude Operators\) \(Distance/Rotation vs Frequency\)](#)
 - [RAOs \(Response Amplitude Operators\) \(Distance/Rotation vs Frequency\)](#)
 - [Hydrodynamic Response \(B4\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Regular Wave 1](#)
 - [Solution \(B5\)](#)
 - [Cable Forces, Whole Cable Forces](#)
 - [Structure Position, RAO Based Response](#)

Units

TABLE 1

Length	Metre
Mass	Kilograms
Rotational Velocity	Degrees
Force	Newton
Frequency	Hertz
Time	Second

Model (A3, B3)

Geometry

TABLE 2

Model (A3, B3) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Details of Geometry	
Attached Assembly Name	C:\Users\pc\AppData\Local\Temp\WB_OPRESPEC_pc_10436_2\unsaved_project_files\dp0\AQW\DM\AQW.agdb
Sea Geometry	
Water Depth	225 m
Water Density	1025 kg/m ³
Water Size X	1000 m
Water Size Y	1000 m
Import Preferences	
Import Solid Bodies	No
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	Yes

Part 3

TABLE 3

Model (A3, B3) > Geometry > Part

Object Name	<i>Part 3</i>
State	Fully Defined
Details of Part 3	
Part Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Total Structural Mass	26837614,91 kg
X Position of COG	-6,82280340697616E-04 m
Y Position of COG	6,81083125527948E-04 m
Z Position of COG	-69,76 m
Generate Internal Lid	No
Current Calculation Depth	0.0 m
Fixity Options	
Structure Fixity	Structure is Free to Move
Force Factors	
Drag Factor	1
Mass Factor	1

Slam Factor	0.0
Advanced Options	
Submerged Structure Detection	Program Controlled
Override Calculated GMX	No
Override Calculated GMY	No
Non-Linear Roll Damping	
Non-Linear Roll Damping	Excluded from Calculations

TABLE 4
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 5
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 6
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Axes

Object Name	<i>Part 3 Axes</i>
State	Fully Defined
Details of Part 3 Axes	
Visibility	Visible
Alignment Method	Global Axes
Rotation About Global Z	0.0°
Rotation About Local Y	0.0°
Rotation About Local X	0.0°
Unit Vector X	[1, 0.0, 0.0]
Unit Vector Y	[0.0, 1, 0.0]
Unit Vector Z	[0.0, 0.0, 1]

TABLE 7
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 8
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 9
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 10
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Point Mass

Object Name	<i>Point Mass</i>
State	Fully Defined
Details of Point Mass	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
X	-6,82280340697616E-04 m
Y	6,81083125527948E-04 m
Z	-69,76 m
Mass Definition	Manual
Mass	26837614,91 kg
Define Inertia Values by	via Radius of Gyration
Kxx	59,26 m
Kyy	59,26 m
Kzz	59,26 m
Ixx	94246929749,9167 kg.m ²
Ixy	0.0 kg.m ²
Ixz	0.0 kg.m ²
Iyy	94246929749,9167 kg.m ²
Iyz	0.0 kg.m ²
Izz	94246929749,9167 kg.m ²

TABLE 11
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 5</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 5	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3

Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	8 m
Y	0.0 m
Z	-12,74 m

TABLE 12
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 6</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 6	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	-8 m
Y	0.0 m
Z	-12,74 m

TABLE 13
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 7</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 7	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	8 m
Z	-12,74 m

TABLE 14
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 8</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 8	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	-8 m
Z	-12,74 m

TABLE 15
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 1</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 1	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	130,55 m
Y	0.0 m
Z	-225 m

TABLE 16
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 2</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 2	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	-130,55 m
Y	0.0 m
Z	-225 m

TABLE 17
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 3</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 3	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	130,55 m
Z	-225 m

TABLE 18
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 4</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 4	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	-130,55 m
Z	-225 m

Connections

TABLE 19
Model (A3, B3) > Connections

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
Details of Connections	

TABLE 20
Model (A3, B3) > Connections > Catenary Data

Object Name	<i>Catenary Data</i>
State	Fully Defined
Details of Catenary Data	

TABLE 21
Model (A3, B3) > Connections > Catenary Data > Catenary Section

Object Name	<i>Catenary Section 1</i>
State	Fully Defined
Details of Catenary Section 1	
Section Properties	
Mass/Unit Length	65 kg/m
Equivalent Cross-Sectional Area	0,0104 m ²
Stiffness, EA	1175000000 N
Maximum Tension	11760000 N
Bending Stiffness, EI	0.0 N.m ²
Axial Stiffness Coefficient k1	0.0 N
Axial Stiffness Coefficient k2	0.0 N
Axial Stiffness Coefficient k3	0.0 N
Section Hydrodynamic Properties	
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter	0,115 m
Longitudinal Drag Coefficient	0,025

TABLE 22
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 6</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 6	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 2 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 6 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1

Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 23
Model (A3, B3) > Connections > Cable 6

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 24
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 7</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 7	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 4 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 8 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m

Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	0.0 N
Initial Cable Tension at End	0.0 N

TABLE 25
Model (A3, B3) > Connections > Cable 7

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 26
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 8</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 8	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 1 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 5 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None

Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 27
Model (A3, B3) > Connections > Cable 8

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 28
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 10</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 10	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 3 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 7 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	

Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 29
Model (A3, B3) > Connections > Cable 10

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

Mesh

TABLE 30
Model (A3, B3) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Meshed
Details of Mesh	
Defaults	
Global Control	Basic Controls
Mesh Parameters	
Defeaturing Tolerance	3 m
Max Element Size	6 m
Max Allowed Frequency	0,831 Hz
Meshing Type	Combined Meshing
Generated Mesh Information	
Number of Nodes	25261
Number of Elements	25281
Number of Diff Nodes	25152
Number of Diff Elements	25158

TABLE 31
Model (A3, B3) > Mesh > Mesh Sizing

Object Name	<i>Mesh Sizing</i>
State	Fully Defined
Details of Mesh Sizing	
Suppressed	Not Suppressed
Select Geometry	3 Bodies
Local Element Size	0,5 m

Hydrodynamic Diffraction (A4)

TABLE 32
Model (A3, B3) > Analysis

Object Name	<i>Hydrodynamic Diffraction (A4)</i>
State	Solved
Details of Hydrodynamic Diffraction	
Analysis Type	Hydrodynamic Diffraction/Radiation

TABLE 33
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Details of Analysis Settings	
Parallel Processing	Program Controlled
Generate Wave Grid Pressures	Yes
Wave Grid Size Factor	2
Common Analysis Options	
Ignore Modelling Rule Violations	Yes
Calculate Extreme Low/High Frequencies	Yes
Calculate Drift Coefficients	Yes
Include Multi-Directional Wave Interaction	Yes
Near Field Solution	Program Controlled
Linearized Morison Drag	No
QTF Options	
Calculate Full QTF Matrix	Yes
Output File Options	
Full QTF Matrix	No
Field Point Wave Elevation	Yes
Source Strengths	No
Potentials	No
Centroid Pressures	No
Element Properties	No
ASCII Hydrodynamic Database	No
Example of Hydrodynamic Database	No

TABLE 34
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Gravity

Object Name	<i>Gravity</i>
State	Fully Defined
Details of Gravity	
Gravity	9,80665 m/s ²

TABLE 35
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Structure Selection

Object Name	<i>Structure Selection</i>
State	Fully Defined
Details of Structure Selection	
Structures to Exclude	None
Group of Structures	
Interacting Structure Groups	None
Structure Ordering	
Structure 1	Part 3

TABLE 36
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Wave Direction

Object Name	<i>Wave Directions</i>
State	Fully Defined
Details of Wave Directions	
Type	Range of Directions, No Forward Speed
Required Wave Input	
Wave Range	-180° to 180°
Interval	45°
Number of Intermediate Directions	7
Optional Wave Directions A	
Additional Range	None
Optional Wave Directions B	
Additional Range	None
Optional Wave Directions C	
Additional Range	None
Optional Wave Directions D	
Additional Range	None

TABLE 37
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Wave Frequency

Object Name	<i>Wave Frequencies</i>
State	Fully Defined
Details of Wave Frequencies	
Intervals Based Upon	Frequency
Frequency/Period Definition	
Range	Manual Definition
Definition Type	Range
Lowest Frequency Definition	Manual Definition
Lowest Frequency	0,025 Hz
Longest Period	40 s
Highest Frequency Definition	Manual Definition
Highest Frequency	0,3183 Hz
Shortest Period	3,14169 s
Number of Intermediate Values	32
Interval Frequency	0,00889 Hz
Additional Frequencies A	
Additional Range	None
Additional Frequencies B	
Additional Range	None

Additional Frequencies C	
Additional Range	None
Additional Frequencies D	
Additional Range	None

Solution (A5)

TABLE 38
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > Hydrostatic Results

Object Name	Hydrostatic
State	Solved
Details of Hydrostatic	
Structure	Part 3
Graphical Representation	
Show Centre of Gravity	Yes
Show Centre of Buoyancy	Yes
Show Centre of Floatation	Yes
Results	
Actual Displaced Volume	
Metacentric Height GMX	
Out of Balance Force/Weight, Fz	

Hydrostatic Results

Structure

Part 3

Hydrostatic Stiffness

Centre of Gravity (CoG)
Position:

X:

-6.8228e-4 m

Y:

6.8108e-4 m

Z:

-69.760002 m

Z

RX

RY

Heave (Z):

2036122.1 N/m

69.095848 N/°

93.822502 N/°

Roll (RX):

3958.9004 N.m/

18544390 N.m/

522.43787 N.m/

Pitch (RY):

5375.6333 N.m/

522.43787 N.m/

18549784 N.m/

Hydrostatic Displacement Properties

Actual Volumetric
Displacement:

26540.377 m³

Equivalent Volumetric
Displacement:

26183.039 m³

Centre of Buoyancy (CoB)
Position:

X:

-6.8241e-4 m

Y:

6.8128e-4 m

Z:

-65.901443 m

Out of Balance
Forces/Weight:

FX:

-1.1322e-6

FY:

4.7292e-7

FZ:

1.3659e-2

Out of Balance Moments/Weight:	MX:	<input type="text" value="4.1483e-5 m"/>	MY:	<input type="text" value="3.1296e-5 m"/>	MZ:	<input type="text" value="5.5172e-6 m"/>
Cut Water Plane Properties						
Cut Water Plane Area:		<input type="text" value="202.56261 m²"/>				
Centre of Floatation:	X:	<input type="text" value="-3.3224e-3 m"/>	Y:	<input type="text" value="2.6254e-3 m"/>		
Principal 2nd Moment of Area:	X:	<input type="text" value="3295.877 m^4"/>	Y:	<input type="text" value="3327.1912 m^4"/>		
Angle Principal Axis makes with X(FRA):		<input type="text" value="5.4801879°"/>				
Small Angle Stability Parameters						
CoG to CoB (BG):		<input type="text" value="-3.8585603 m"/>				
Metacentric Heights (GMX/GMY):		<input type="text" value="3.9827437 m"/>		<input type="text" value="3.9839237 m"/>		
CoB to Metacentre (BMX/BMY):		<input type="text" value="0.1241835 m"/>		<input type="text" value="0.1253634 m"/>		
Restoring Moments about Principal Axes (MX/MY):		<input type="text" value="18544340 N.m"/>		<input type="text" value="18549832 N.m"/>		

TABLE 39
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global X
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,318
Position of Max in X	0,025
Minimum Value	0,002
Maximum Value	1,274
Line B	
Structure	Undefined...

FIGURE 1
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

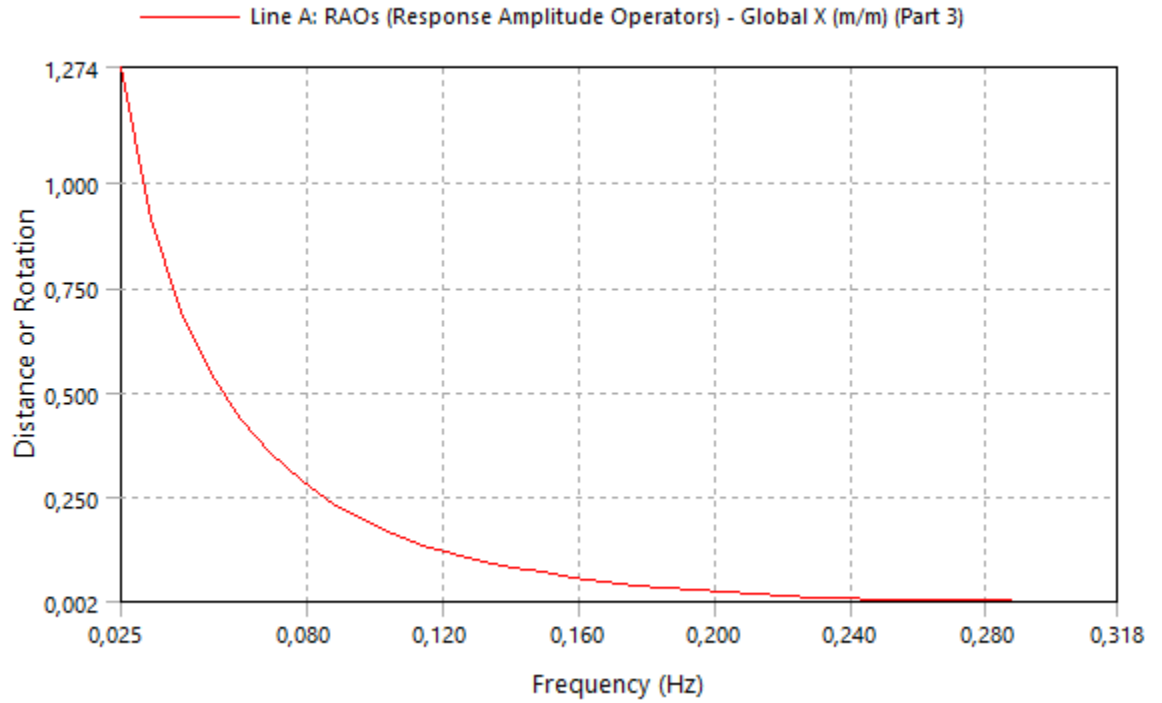


TABLE 40
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (m/m)
0,025 Hz	1,27423965930939
0,03389 Hz	0,910169720649719
0,04278 Hz	0,6917804479599
0,05166 Hz	0,544902384281158
0,06055 Hz	0,437321126461029
0,06944 Hz	0,353785336017609
0,07833 Hz	0,28790870308876
0,08722 Hz	0,236033320426941
0,0961 Hz	0,195375457406044
0,10499 Hz	0,163382187485695
0,11388 Hz	0,137862652540207
0,12277 Hz	0,117065563797951
0,13165 Hz	9,96988192200661E-02
0,14054 Hz	8,48575085401535E-02
0,14943 Hz	7,19619914889336E-02
0,15832 Hz	6,11772909760475E-02
0,16721 Hz	5,12559674680233E-02
0,17609 Hz	4,27022874355316E-02
0,18498 Hz	3,53727526962757E-02
0,19387 Hz	2,92303208261728E-02

0,20276 Hz	2,41431556642056E-02
0,21165 Hz	1,99120230972767E-02
0,22053 Hz	1,64253227412701E-02
0,22942 Hz	1,35675938799977E-02
0,23831 Hz	1,12416157498956E-02
0,2472 Hz	9,34372097253799E-03
0,25608 Hz	7,79184373095632E-03
0,26497 Hz	6,49851001799107E-03
0,27386 Hz	5,38828410208225E-03
0,28275 Hz	4,73396899178624E-03
0,29164 Hz	3,9525399915874E-03
0,30052 Hz	3,31180822104216E-03
0,30941 Hz	2,76175234466791E-03
0,3183 Hz	2,26745335385203E-03

TABLE 41
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global Z
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,141
Position of Max in X	0,043
Minimum Value	2,2e-4
Maximum Value	10,402
Line B	
Structure	Undefined...

FIGURE 2
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

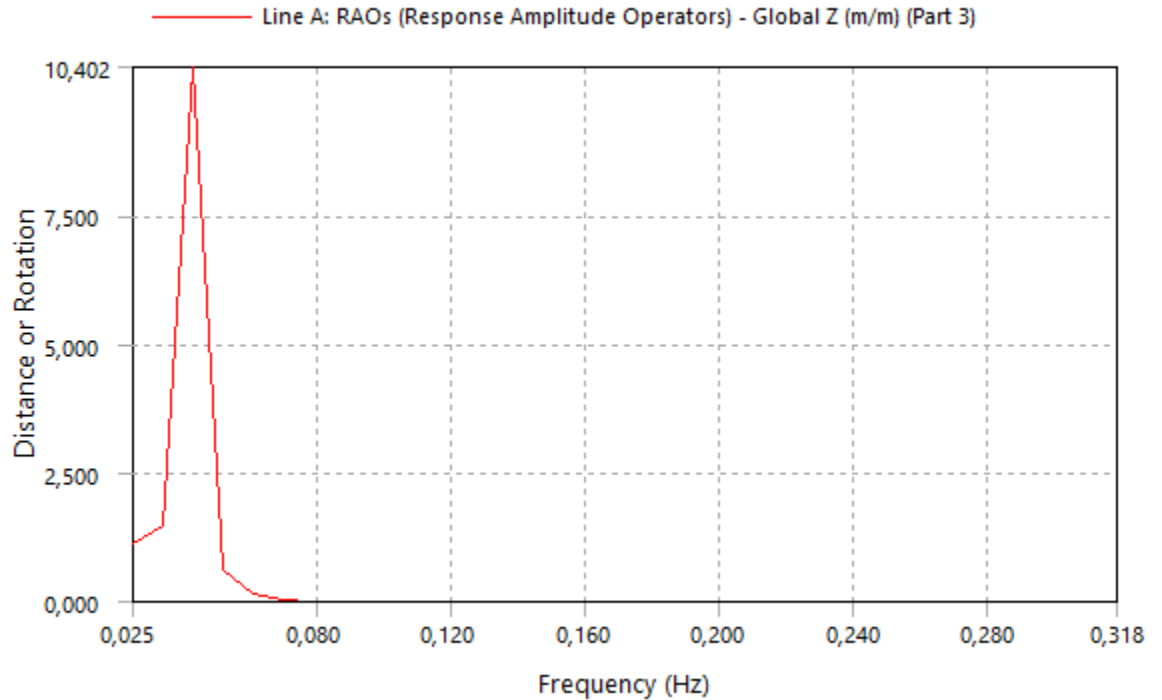


TABLE 42
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (m/m)
0,025 Hz	1,11430060863495
0,03389 Hz	1,47169673442841
0,04278 Hz	10,4024295806885
0,05166 Hz	0,625064373016357
0,06055 Hz	0,152812778949738
0,06944 Hz	4,89389486610889E-02
0,07833 Hz	1,72751415520906E-02
0,08722 Hz	6,51185400784016E-03
0,0961 Hz	2,66876234672964E-03
0,10499 Hz	1,23585166875273E-03
0,11388 Hz	6,55088340863585E-04
0,12277 Hz	3,92330170143396E-04
0,13165 Hz	2,67464958596975E-04
0,14054 Hz	2,21711728954688E-04
0,14943 Hz	2,25677198613994E-04
0,15832 Hz	2,51727818977088E-04
0,16721 Hz	2,89440184133127E-04
0,17609 Hz	3,2861961517483E-04
0,18498 Hz	3,74582916265354E-04
0,19387 Hz	4,19539079302922E-04

0,20276 Hz	4,64058568468317E-04
0,21165 Hz	5,06952812429518E-04
0,22053 Hz	5,47593168448657E-04
0,22942 Hz	5,8303406694904E-04
0,23831 Hz	6,11881900113076E-04
0,2472 Hz	6,30663824267685E-04
0,25608 Hz	6,34396739769727E-04
0,26497 Hz	6,08757545705885E-04
0,27386 Hz	5,31589903403074E-04
0,28275 Hz	5,99862542003393E-04
0,29164 Hz	5,24351955391467E-04
0,30052 Hz	4,56246139947325E-04
0,30941 Hz	3,93692083889619E-04
0,3183 Hz	3,37320700054988E-04

TABLE 43
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global RY
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,318
Position of Max in X	0,069
Minimum Value	0,004
Maximum Value	0,24
Line B	
Structure	Undefined...

FIGURE 3
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

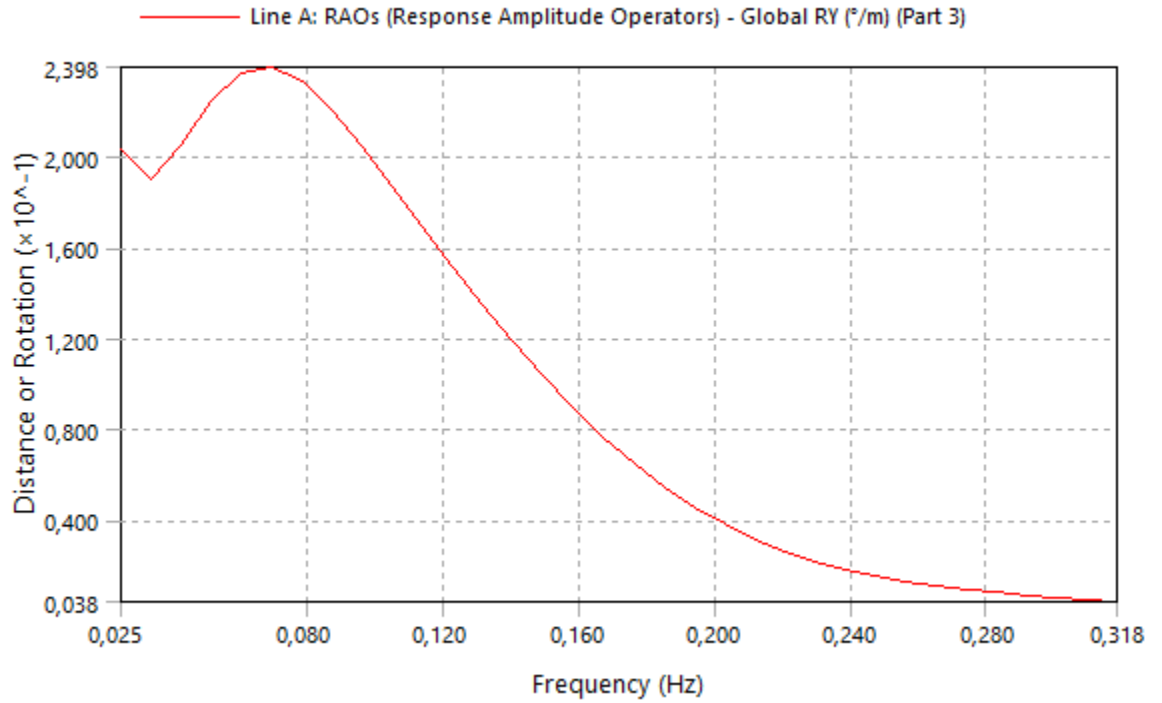


TABLE 44
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (°/m)
0,025 Hz	0,203812978235313
0,03389 Hz	0,189928817818477
0,04278 Hz	0,205363444517119
0,05166 Hz	0,224658848984324
0,06055 Hz	0,237499204417551
0,06944 Hz	0,23976423922063
0,07833 Hz	0,23314231745945
0,08722 Hz	0,220483655730316
0,0961 Hz	0,204439287905904
0,10499 Hz	0,186911435010278
0,11388 Hz	0,169084761338464
0,12277 Hz	0,151599823908775
0,13165 Hz	0,134746051987291
0,14054 Hz	0,118656180695577
0,14943 Hz	0,103433896840907
0,15832 Hz	8,98426608260147E-02
0,16721 Hz	7,66768108602606E-02
0,17609 Hz	6,48748442840736E-02
0,18498 Hz	5,44641185397201E-02
0,19387 Hz	0,045527543052379

0,20276 Hz	3,79772891932456E-02
0,21165 Hz	3,15987996429529E-02
0,22053 Hz	2,62682938980608E-02
0,22942 Hz	2,18478341538469E-02
0,23831 Hz	1,82079336306652E-02
0,2472 Hz	1,52133192313844E-02
0,25608 Hz	1,27473007758925E-02
0,26497 Hz	1,06818455677847E-02
0,27386 Hz	8,86923158970297E-03
0,28275 Hz	7,81815702365125E-03
0,29164 Hz	6,55631876136774E-03
0,30052 Hz	5,51181425032819E-03
0,30941 Hz	4,60868306579766E-03
0,3183 Hz	3,7908567084829E-03

Hydrodynamic Response (B4)

TABLE 45
Model (A3, B3) > Analysis

Object Name	<i>Hydrodynamic Response (B4)</i>
State	Solved
Details of Hydrodynamic Response	
Analysis Type	Hydrodynamic Time Response

TABLE 46
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Details of Analysis Settings	
Computation Type	Time Response Analysis
Parallel Processing	Program Controlled
Use Cable Dynamics	Yes
Time Response Specific Options	
Analysis Type	Regular Wave Response
Start Time	0.0 s
Time Step	1 s
Duration	3600 s
Number of Steps	3601
Finish Time	3600 s
Starting Position	Program Controlled
Common Analysis Options	
Convolution	Yes
Call Routine "user_force"	No
Use Linear Starting Conditions	No
Use Linear Stiffness Matrix to Calculate Hydrostatic	No
Account for Current Phase Shift	Yes
Use Wheeler Stretching	No
Tube Drag Coefficients	Defined in Geometry
Output File Options	
Joint Axis System for Joint Reaction Force	Fixed Reference Axes
Data List	Yes

Element Properties	No
--------------------	----

TABLE 47
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Regular Wave

Object Name	<i>Regular Wave 1</i>
State	Fully Defined
Details of Regular Wave 1	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Wave Definition	
Wave Type	Airy Wave Theory
Direction	0°
Amplitude	1 m
Period	25,1818 s
Frequency	3,97112200081011E-02 Hz
Ramping Method	Program Controlled

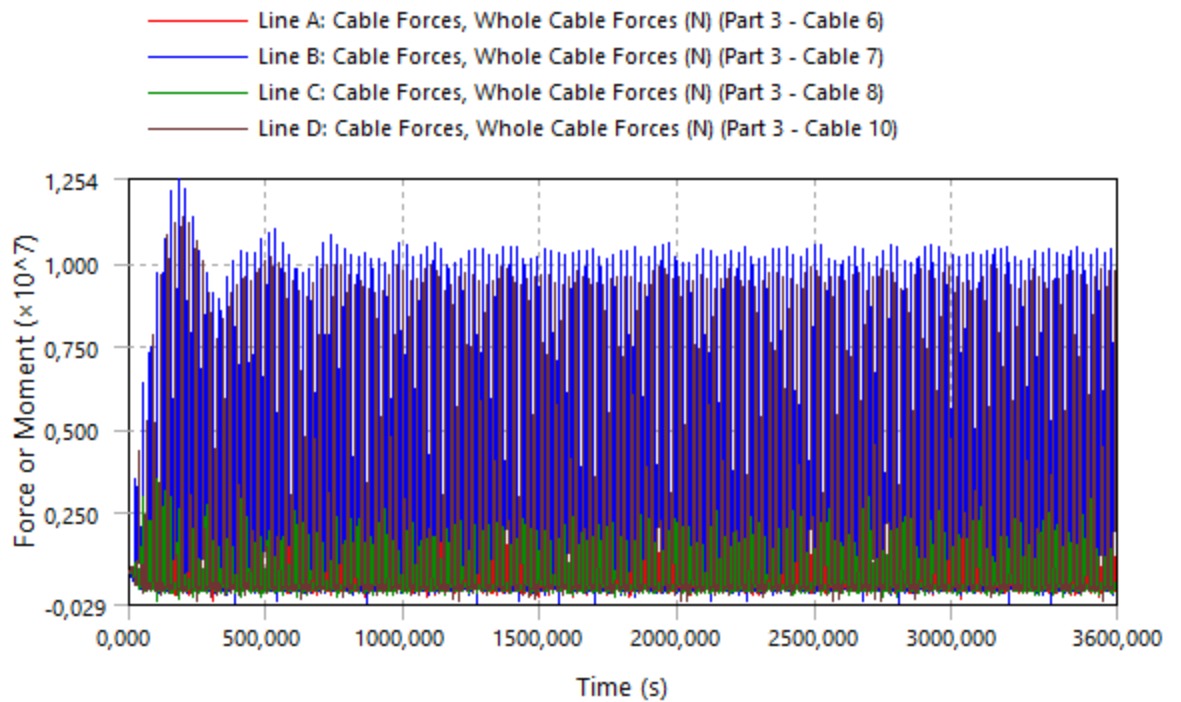
Solution (B5)

TABLE 48
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Solution (B5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>Cable Forces, Whole Cable Forces</i>
State	Solved
Details of Cable Forces, Whole Cable Forces	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Force/Moment vs Time
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 6
Position of Min in X	308
Position of Max in X	457
Minimum Value	-149667,406
Maximum Value	3758483,25
Line B	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 7
Position of Min in X	3357
Position of Max in X	180
Minimum Value	-288546,094
Maximum Value	12542441
Line C	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces

SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 8
Position of Min in X	104
Position of Max in X	102
Minimum Value	-168373,578
Maximum Value	3506300,25
Line D	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 10
Position of Min in X	2565
Position of Max in X	194
Minimum Value	-185135,031
Maximum Value	11373993

FIGURE 4
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Solution (B5) > Cable Forces, Whole Cable Forces



LAMPIRAN D

SCRIPT MATLAB

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SCRIPT MATLAB

```
clc;clear; close all;
warning off MATLAB:divideByZero
sheet = 'sheet3'
A = xlsread('DATA MENTAH TERTAMBAT TEGANGAN TALI',sheet);
t = A(:,1);
s = A(:,2);
h = A(:,3);
p = A(:,4);
f1= A(:,5);
f2= A(:,6);
f3= A(:,7);
f4= A(:,8);

sfr = 1;
t = (1:length(t))/sfr;

shpf = [s,h,p,f1,f2,f3,f4];
for i=1:7
    subplot(7,1,i)
    plot(t,shpf(:,i));
    if i==1
        ylabel('\zeta_x (mm)');
    elseif i==2
        ylabel('\zeta_z (mm)');
    elseif i==3
        ylabel('\zeta_p (deg)');
    else
        ylabel('F (gr)');
    end
end
xlabel('t (sec)');

[xb,yb]=ginput(2);
BatasBawah = max(round(xb(1)*sfr),1);
BatasAtas = min(round(xb(2)*sfr),size(s,1));
k = BatasBawah:BatasAtas;lenk = length(k);

tk =(BatasBawah:BatasAtas)'/sfr;
sk = s(k);
hk = h(k);
pk = p(k);
f1k= f1(k);
f2k= f2(k);
f3k= f3(k);
f4k= f4(k);
shpfk = [sk,hk,pk,f1k,f2k,f3k,f4k];

figure;
for i=1:7
    subplot(7,1,i)
    plot(t,shpf(:,i),tk,shpfk(:,i),'r');
    if i==1
        ylabel('\zeta_x (mm)');
    elseif i==2
```



```

        ylabel('\zeta_z (mm)');
    elseif i==3
        ylabel('\zeta_p (deg)');
    else
        ylabel('F (gr)');
    end
end
xlabel('t (sec)');

figure;
for i=1:7
    Yf = shpfk(:,i);
    lenk = length(Yf);
    sr=1/sfr;
    TT = (0:lenk-1)./sfr;
    tmax=TT(end)-TT(1);
    fdf=1/lenk/sr;
    ff=(0:fd:1/2/sr);
    FF=sr*fft(Yf);
    famp1=2/(tmax+sr)*abs(FF);
    TT = (0:lenk-1)./sfr;
    tmax=TT(end)-TT(1);
    fdf=1/lenk/sr;
    ff=(0:fd:1/2/sr);
    FF=sr*fft(Yf);
    amp1=2/(tmax+sr)*abs(FF);
    periode(:,i)=(1./(ff(1:length(ff))))';
    Ampl(:,i)=amp1(1:length(ff));
    subplot(7,1,i)
    plot(periode(:,i),Ampl(:,i));
    if i==1
        ylabel('\zeta_x (mm)');
    elseif i==2
        ylabel('\zeta_z (mm)');
    elseif i==3
        ylabel('\zeta_p (deg)');
    else
        ylabel('F (gr)');
    end
end
xlabel('t (sec)');

period= periode(2:end,1)
hasil = Ampl(2:end,:)
[Amplheave,n] = max(hasil(:,2));
Period      = period(n)
Amplsurge   = hasil(n,1)
Amplheave
Amplpitch   = hasil(n,3)
Amplf1      = hasil(n,4)
Amplf2      = hasil(n,5)
Amplf3      = hasil(n,6)
Amplf4      = hasil(n,7)

```

BIODATA PENULIS



Moch Agus Riandyka lahir di Kota Ternate, Maluku Utara, pada tanggal 4 Agustus 1995. Penulis merupakan putra pertama dari Muhammad Rizal dan Andi Kirana. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Negeri 2 Indonesiana Tidore, SMP Negeri 1 Tidore, dan SMA Dwiwarna (*Boarding School*) Bogor. Setelah menempuh pendidikan menengah atas pada tahun 2013, penulis melanjutkan jenjang pendidikan tinggi di Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia (UII) selama setahun dan akhirnya pada tahun 2014 diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS).

Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif pada kegiatan keprofesian dan non-akademik seperti organisasi dan kepanitiaan. Pada tahun pertama penulis aktif di kepanitiaan ITS Expo 2015 dan Petrolida 2015. Selanjutnya, pada tahun kedua penulis aktif di kepanitiaan ITS Expo 2016, Oceano 5, dan Petrolida 2016, disamping aktif juga di organisasi BEM FTK ITS sebagai staf biro kajian strategis dan di organisasi Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Ukafo Fotografi ITS sebagai staf divisi hunting dan materi. Pada tahun ketiga penulis aktif sebagai Ketua UKM Ukafo Fotografi ITS, kepanitiaan Oceano 2017, dan volunteer Peksiminal BPSMI Jawa Timur Rating Lomba Fotografi. Pada tahun 2017, penulis berkesempatan melakukan kerja praktek di PT. Global Maritime Indonesia pada divisi engineering selama 2 bulan. Pada tahun terakhir penulis menjadi pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS dan tertarik dengan bidang hidrodinamika lepas pantai. Oleh karena itu, penulis mengambil topik Tugas Akhir olah gerak bangunan struktur SPAR *Helical Strakes* dalam keadaan terapung bebas dan tertambat yang dianalisis secara numerik dan eksperimen.

Email: mochagusriandyka@gmail.com